

Title	高速道路交通計画におけるファジィ理論と知識工学手法の応用に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	秋山, 孝正
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1989-11-24
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r7003
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

新 制
工
785
京大附図

高速道路交通計画におけるファジィ理論 と知識工学手法の応用に関する研究

1989年 4 月

秋 山 孝 正

目 次

第1章 序 論	3
第2章 土木計画におけるファジィ理論と知識工学手法の応用についての整理	13
2-1 概 説	13
2-2 ファジィ理論の土木計画への応用についての整理と展望	14
2-2-1 ファジィ理論と土木計画	14
2-2-2 ファジィ集合の基礎理論	15
2-2-3 ファジィOR手法	19
2-2-4 ファジィ推論とファジィ制御	21
2-2-5 その他のファジィ手法	24
2-2-6 ファジィ理論応用についての展望	28
2-3 知識工学手法の土木計画への応用と展望	32
2-3-1 知識工学手法の概観	32
2-3-2 土木計画における知識工学手法の応用	36
2-3-3 土木計画における応用での問題点	37
2-3-4 知識工学手法応用への期待	38
2-4 結 語	39
第3章 都市高速道路のファジィ交通制御についての研究	47
3-1 概 説	47
3-2 交通制御の現状とファジィ交通制御の必要性	49
3-2-1 交通制御における情報収集と処理	49
3-2-2 都市高速道路の交通制御の現状	49
3-2-3 流入制御におけるファジィ性	51
3-2-4 ファジィ制御の必要性	52
3-3 ファジィ流入制御モデル	55
3-3-1 ファジィ制御の方法	55
3-3-2 モデル作成のための準備	58
3-3-3 入力変数の設定	60
3-3-4 ファジィ制御プロセス	62
3-3-5 制御パターンの出力手順	66

3-3-6	パラメータの決定	67
3-3-7	計算結果の検討	68
3-3-8	モデルの各種検討	71
3-4	ファジィ流入制御モデルの実用的改良	78
3-4-1	モデル構造の改良	78
3-4-2	ファジィ交通制御の実用的検討	83
3-4-3	交通制御内容の変更と評価	92
3-5	結 語	104
第4章	交通制御エキスパートシステムについての研究	109
4-1	概 説	109
4-2	エキスパートシステムの概要	111
4-2-1	知識工学について	111
4-2-2	プロダクションシステム	111
4-3	交通制御エキスパートシステムの作成	113
4-3-1	交通制御手順の検討	113
4-3-2	エキスパートシステムの作成	115
4-3-3	システムの挙動	117
4-3-4	基本システムについての検討	119
4-3-5	基本システムに関するまとめ	121
4-4	交通制御エキスパートシステムの実用的改良	122
4-4-1	実用的エキスパートシステムの提案	122
4-4-2	交通制御エキスパートシステムの全体構成	124
4-4-3	交通制御ルールに関する改良	126
4-4-4	入出力に関する実用的改良	130
4-4-5	確信度の導入に関する改良	131
4-5	実用的なシステム改良とその結果	135
4-5-1	改良型エキスパートシステムの実用性	135
4-5-2	交通制御ルールの実用的変更	143
4-5-3	ファジィ性導入に関する検討	145
4-6	結 語	147
第5章	高速道路交通情報処理への知識工学手法の応用についての研究	153
5-1	概 説	153

5-2	交通情報提供の現状	154
5-3	交通情報提供エキスパートシステムの作成	157
5-3-1	交通情報提供エキスパートシステムの概要	157
5-3-2	システムの全体構成	158
5-3-3	情報提供ルール構成と役割	162
5-3-4	システムの挙動	166
5-4	交通情報提供方法の評価	174
5-4-1	情報提供ルールの評価方法	174
5-4-2	情報提供ルールの改良	178
5-4-3	改良ルールの適用結果と比較検討	181
5-4-4	検討結果のまとめ	189
5-5	結 語	190
第6章	高速道路交通安全対策立案へのファジィ理論の応用についての研究	195
6-1	概 説	195
6-2	都市高速道路の安全対策立案手順	196
6-2-1	都市高速道路における交通事故の基礎的分析	196
6-2-2	安全対策立案手順についての検討	197
6-3	安全対策立案の各種定式化と解法	198
6-3-1	便益費用比を用いる方法	199
6-3-2	増分的費用便益分析による方法	200
6-3-3	ダイナミックプログラミングによる方法	203
6-3-4	整数計画法による方法	204
6-4	都市高速道路における検討	205
6-4-1	対策案の作成	205
6-4-2	計算結果と各手法の比較検討	208
6-5	ファジィ制約を持つ立案計画	213
6-5-1	ファジィ数理計画法	213
6-5-2	ファジィ制約をもつ増分便益費用分析	215
6-5-3	ファジィ制約をもつDPによる分析	217
6-6	結 語	219
第7章	結 論	225

第 1 章

序 論

第1章 序 論

一般に、交通とは広義には人、財貨および情報の場所的移動をさすが、交通計画と称する場合には、狭義の意味として交通対象を人と物資の移動を考えている¹⁾。また交通計画は都市計画の中でも重要な位置を占め現在でも中心的に検討していくべきものである。この言葉を一意に定義することは難しいが、ある種の定義によれば交通計画（transportation planning）とは、地域社会のなかにおいて、ある交通目的を実現するために、新たな交通機関施設を計画したり、交通に対応する制度とか運用方式を政策的に考えたりすることである。すなわち前者はハード的な対応で、後者はソフト面での対応である²⁾とされている。いずれの方向性も必要とされるが、ここで近年の社会的動向を考えると後者の必要性はますます増大しているといえる。

またわが国における自動車輸送は、近年長距離分野への侵出が著しく現在ではその輸送の多くの部分を占めるにいたっている。これは、路線トラック輸送の長距離化と大型化に負うところが大きく、また高速道路をはじめとする幹線道路の整備の促進により、自動車の持つ迅速性、機動性、確実性等の利点がいっそう発揮されるようになったことを示している。このことからわかるように、交通施設としての道路のもつ大きな特性は、その密度が極めて高く連続性の高いネットワークを形成していることにある。わが国の道路網の現状をみると、初期の徒歩中心の時代から、欧米諸国が経てきたような馬車交通の時代をもつことなく、道路網整備は貧弱なまま急激なモータリゼーションの時代を迎えた。したがって幹線道路の整備が交通需要の増大に追いつかず、体系的な道路の機能分担が行われているとは言い難い状況にある³⁾。

このようなことを考えると経済社会活動の基本である安全かつ円滑な道路交通の確保や良好な居住環境の形成を図るため、国土の発展基盤としての高規格な幹線道路網から身の回りの市町村道に至るまで、各段階での道路がそれぞれ本来の機能を分担できるようネットワークの強化を図って行く必要があるといえる。

本研究は、都市における交通計画のなかでも「高速道路の計画」に注目し研究を進めていく。そこで、特に高速道路の現状に目を向けると、わが国の高規格幹線道路の供用延

長は、昭和62年度末で4,387kmに達している。しかしこれは21世紀初頭をめざす道路整備の長期的展望にたつ計画延長14,000kmの31%に過ぎない。高速自動車道の沿線において開発が進展しており、高速自動車国道の整備が地域開発を促進し、産業の振興、終業機会の増大等をもたらしている。しかしながら、高速自動車国道の整備は通過していない地域がまだ数多く残されているなど、全国的なネットワークとしての形成はなお不十分である。³⁾

わが国においては都市間高速道路である東名高速道路、名神高速道路は高速自動車道路の中心的なものとして最も重要な役割を果たしているが、これらも計画当初の予想を上回る交通量の増大により、一部の区間や時間帯によっては多大な混雑状況が発生し、高速性、定時性を確保することが困難になってきている。こうした混雑状況は、国土の均衡ある発展を遅らせるばかりでなく、国民生活や経済活動に多大な損害を与えており、その解決のためには混雑区間の拡幅等を推進するとともに高速自動車国道ネットワークの整備を積極的に推進していく必要があると考えられている。

また都市内の道路に注目すれば、多くの都市において中心市街地で著しく交通が混雑しており、特に都市内の主要幹線である国道都市高速道路ともに慢性的な交通渋滞を生じている。これにともなって都市内における幹線道路の旅行速度は低下し、健全な都市活動に障害をもたらしている。都市における高速道路の一層の必要性はこのことから明らかであり、とくに大量の自動車交通需要の効率的処理・機能分化、高規格幹線道路網など全国的な高速交通サービスの円滑な連続性確保、多核都市構造への変革支援を図るためにとくに有意義となるであろう。また交通機能に卓越した自動車専用道路網の整備が現在ではほぼ完了しているのに対して、都市の環状方向の自動車専用道路の整備が大幅に遅れていることから、交通の円滑化と都市機能の再構成に資するため、首都・阪神高速道路などの都市高速道路の一層の整備拡充が急務とされている。

このように都市内における自動車交通を円滑に処理し、活力ある都市構造を誘導するためには、放射・環状パターンを基本として、幹線道路のネットワークを形成することが必要であり、都市内および都市間の高速道路網の整備・拡充は交通計画のうえでもますます重要になっていくものと考えられる。

本研究ではとくにこのような高速道路の計画という点から重要となる問題として以下の様なものを考えている。

- ①交通制御の方法
- ②交通情報の処理
- ③交通安全施設の計画

いずれの課題も最終的な目標は、「高速道路上の円滑、安全、快適な走行を維持する。」ことに対応しているといえる。こうしたいくつかの高速道路の交通計画について若干検討してみることにする。

まず近年各種の通信技術の急速な進歩と効率的な情報処理の方法が開発され、交通問題にも情報化を考える必要が生じている。そして一般の道路利用者においても比較的容易に情報を得ることが可能となってきたおり、特に最近では高度で多様な情報が求められている。すでにわが国でも、各道路管理者においてこうした利用者の要望に対応すべく、各種の施策が検討されている。ここで注意する点は、利用者の求めるすべての情報を提供するための効率的な情報処理を行うことが必ずしも妥当な計画であるとはいえない。さらに考えたような円滑、快適、安全を考えても、多くの複雑な情報をもたらすことによってかえって交通の混乱を招く場合も十分に考えられる。したがって、必要な情報を妥当な形で処理するという、いわゆる情報の整理と効率的な処理が重要である。

第1の交通制御の問題について考えると、効率的な交通情報の収集とその処理をおこなうことで、これまでの情報処理においては、不十分であった各種の問題を解決することができる。理論的に画一的に定量化し、いわゆる最適状態を導出することは、問題の性質理解、理想的状态の提示という意味では重要である。しかし、昨今では、交通制御の意志決定が、人間の思考のもとで、随時行われることにより、適切な制御結果を生じていることから人間の経験的知識の有効性を知ることができる。つまりこれまでの各種研究結果や実際の交通制御における知識を得ることによって、知識ベースモデルを作成することが第一の目的である。

第2に交通情報の処理について考へてみる。一般に車利用者は自らの走行に対して、道路、交通状態に対して何らかの情報を必要としている。特に高速道路のような一般道と隔離された道路の場合には、道路利用者は、代替的な経路の選択をあらかじめ知っておくことによって、効率的な走行が可能となる。特に、交通事故などの偶発的事象の場合には重要となると考えられる。道路管理者の立場からは関係交通ネットワークの状態をもとに利用者

の誘導が容易な情報の伝達方法をとることで、いわゆる情報による交通制御が可能となると考えられる。しかし、現実には道路利用者は個人の最短経路あるいは広い意味での交通費最小化をはかろうとするため、必ずしも経路の誘導をおこなうことで十分な満足がえられるとは限らないのである。したがって、情報の伝達にはその適切性の評価を含んだ、変更の容易な方法を用いなければならない。交通工学的課題としては、「交通の円滑化を考えた妥当な情報処理」であるといえる。一般に情報は昨今多様であり、また各種のものが存在する。ここで適切な情報の処理が必要となる。人間性を含んだ、あるいは一般の道路利用者に受け入れられやすい形ということがらは利用者認識をとりこんだものが必要とされるかもしれない。

第3にあげられるのは、都市における安全からみた計画の必要である。都市における高速道路においては、円滑走行をはかる必要があることから、交通の安全性を考えることは重要である。高速道路はその運営管理の実状を考えるとひとつの交通システムを形成していると考えることができる。この中にあって、安全性を無視した計画は正しい方向ではないと考えられる。ただ、実際の計画においては一定の予算のもとでできる限りの最適性をもつものを実施しなければならない。ここで計画におけるファジィ性が重要となるであろう。

本研究においては以上のようなこれまでの高速道路における計画手法の応用的側面を見直す意味から図1-1に示すような構成で研究をすすめる。

さて、ここでひとつ重要となることは、近年社会が高度情報化し、社会・経済が安定成長に移り変わってきたことから、国民の生活様式や価値観が多様化してきており、道路網についても質の高い多様な機能が求められるようになってきていることである。こうした背景を考えれば、従来比較的一般に行われていた都市交通現象の問題点を個別に解決し満足させていくという「現象論的計画」に対して、ある種の統一的価値観にもとづいた「価値論的計画」が必要となると考えられる¹⁾。このために具体的な研究においては、新しい計画手法の利用と既存方法の実用的工夫が重要となっているといえよう。本研究では、高速道路における交通計画に対して最終的な目標として計画に人間性を含ませるということを考えている。これは具体的には、高速道路を都市において周辺地域との整合あるものとする²⁾ことである。またこれを利用する者あるいは運用・管理していく者はいずれもわれわ

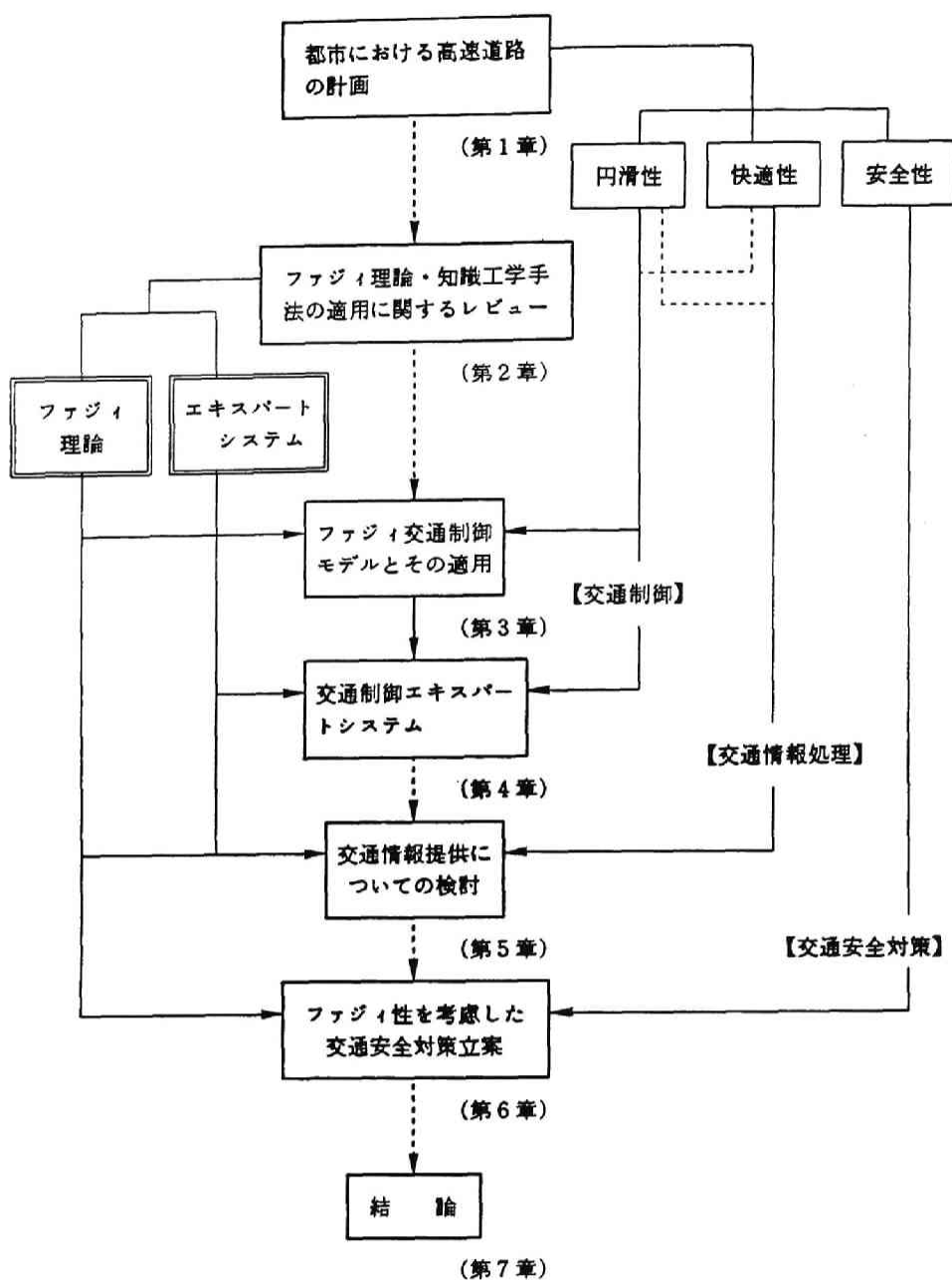


図1-1 本研究のフロー

れ人間であって、その意味で人間的判断や理解の入る余地を計画に残しておこうとするものである。

以下の研究においては、このような最終的な目的に達する第1ステップとして、ファジィ理論と知識工学手法の利用を試みている。

まず第2章において、本研究でこれまでの計画の考え方に加えて、人間的要因を含ませるためにここで提案する、ファジィ理論（あるいは、ファジィ集合論：Fuzzy Set Theory）と知識工学的手法（Knowledge Engineering Approach）について検討する。これらの方法は、いずれも近年その応用性が重要視されてきており、土木計画・交通工学の分野においてもその実用的応用が盛んとなりつつある。ここではこの点から従来の研究結果を整理するとともにその適用についての若干の展望をおこなう。

第3章においてはまず都市高速道路における交通制御の問題に注目する。近年種々の計測機器あるいは光ファイバー等の情報伝達手段は飛躍的に進歩をとげ、交通管制システムも整備充実され実際の交通渋滞対策等に用いられている。そして収集した情報を総合化し、これをもとに適切な判断を下し、効率的な道路の運用を図り利用者の円滑かつ安全な走行を実現することが交通管制の目的である。これまで数々の検討がなされたたとえば、現在の阪神高速道路の交通管制システムでは、交通管制担当者に対してLP制御、逐次ランプ閉鎖制御、緊急時制御の計算結果がCTRの表示を通じて自動提案される。しかし複雑な周囲の状況からこれからの計算結果をそのまま運用せず、管制担当者の判断の参考に任されているのが現状である。短時間に各種情報を総合化し適切な制御パターンを導くための労力は甚大であり、また制御のおくれ、判断における迷い、判断の差異などから交通管制の効率化を妨げる一因となっている。本研究は、交通管制における収集情報をより効率的に処理するための改善の方向を検討することを目的としている。この目的を達成するため、実際に行われている交通管制担当者による意志決定の過程をモデル化しこれにより問題点を検討する方法を採用している。ここでの研究の主目的は、交通制御上のファジィな判断をモデル化することである。すでにファジィ集合理論の適用としてファジィ制御は広く注目を集めている方法である。実際の交通制御という点から考えると、人間の判断をモデル化することは、実際に行われているファジィな判断プロセスを記述することである。すなわち注意しなければならない点は、これは交通制御における“いいかげんな”判断をモデ

ル化するものではないという点である。こうした人間の判断における有意性を十分に用いることができるのである。

第4章は、第3章と研究の目的を同じくしており、ここでも交通制御における効率的な情報処理をめざすが、とくに従来の交通制御をマニュアル化した制御パターンを実用的に用いることのできるエキスパートシステムを構築することを主目的とする。実用的であることを中心として考えるためには、たとえば阪神高速道路全域を対象としたシステム構築が必要である。エキスパートシステムはルールの形式で判断をまとめるという知識工学のひとつの実現形態である。今日のようにこの方法が一般によく用いられている背景には、システムの理解の容易性とその実用性の理解があるといえよう。本研究に示されるテキストベースとしてのシステムを実際の問題に多く用いていくことが重要となるであろう。

第5章においてはいわゆる交通情報の処理に着目している。交通の問題に必要な情報は妥当な形式で表現されなければならない。特に高速道路とその利用を考えれば、適切な情報を適切な形で利用者に伝達することが重要である。具体的には、都市間高速道路における情報板への情報処理であり、これは各種の計測機器などから得られる情報を収集し妥当な形で表示するものである。このような情報提供は旧来から利用者サービスの一部として行われている。そして近年その情報の有用性から実用化が検討されているものである。ここでは前章で検討した成果をもとにファジィ手法、知識工学手法のそれぞれの特徴を生かしたモデルを構築する。

第6章においては、都市における高速道路の施設の計画を交通安全の面からとらえたものである。ここで基本となるのは、高速道路での安全対策がいかなる効果を与えるかはすでに計測されているものとし、限られた予算の中でいかに効率的に代替案を構築するかという問題である。ここでもファジィ手法の適用可能性が存続する従来型の余裕をもたない意志決定に対して、制御をファジィなものとして組み立てようとするものである。この意味で、ファジィな最適計画を目指すものである。

以上のように本研究は、都市交通の中でも高速道路の計画に注目し研究をおこなうものである。高速道路という点から考えると交通工学における各種の課題の一部を検討したことに対応する。そして、情報化時代を反映したいくつかの具体的方法論として、ファジィ理論と知識工学手法を用いているものである。前者は近年、比較的方法論的な体系化が進んでいる研究であるといえ、また後者は応用的側面から実用的展開が今後重要な問題であ

る。これらの方法そのものが基本的な検討段階にあり、今後の検討が期待されるものである。本研究によって計画に人間性をもたせるという基本的な目的が若干でも達成されることを期待するものである。

〔第1章参考文献〕

- 1) 佐佐木綱：都市交通計画（第2版），1983.
- 2) 松本嘉司：交通計画学，培風館，1985.
- 3) 建設省編：昭和62年版，昭和63年版建設白書，大蔵省印刷局，1987，1988.

第2章

土木計画におけるファジィ理論と 知識工学手法の応用についての整理

2-1 概 説	13
2-2 ファジィ理論の土木計画への応用についての整理と展望	14
2-2-1 ファジィ理論と土木計画	14
2-2-2 ファジィ集合の基礎理論	15
2-2-3 ファジィOR手法	19
2-2-4 ファジィ推論とファジィ制御	21
2-2-5 その他のファジィ手法	24
2-2-6 ファジィ理論応用についての展望	28
2-3 知識工学手法の土木計画への応用と展望	32
2-3-1 知識工学手法の概観	32
2-3-2 土木計画における知識工学手法の応用	36
2-3-3 土木計画における応用での問題点	37
2-3-4 知識工学手法応用への期待	38
2-4 結 語	39

第2章 土木計画におけるファジィ理論と 知識工学手法の応用についての整理

2-1 概 説

本章では、近年各分野において適用が盛んであるファジィ理論と知識工学手法について、特に土木計画におけるこれまでの適用研究とその成果について検討することにする。これらの2種類の方法は必ずしも両者が同時に提唱されたものではないが、その発展した時期はほぼ同じである。そして、いずれも昨今の計算機技術の進歩に依存するところが大きいこともその発展のプロセスの同一性を示唆するものである。

しかし、両者がかならずしも一体となって発展してはおらず、いくつかの接点はあるもののこれらの完全に統合したものは現れていない。たとえば、知識工学は応用的分野で成果をあげ、エキスパートシステムの構築をひとつの研究目標として掲げている。計算機の利用という点だけを考えれば、知識工学は確かに計算機の判断を人間の思考に近づけるといふ計算機科学の当初からの目的を追求しているものといえよう。

これに対してファジィ理論は、ファジィ性（この定義は難しいが、不確実性のなかにあって人間のもつ判断の幅に起因するものと考えられる）を従来のいろいろな問題に応用することを目的としており、必ずしも計算機の利用と一体となるものではない。

しかしいずれの方法においても「人間」の存在を考えることが主要な課題となっている。このことは計画を行ううえで基本的に必要とされる点であり、この意味からこれら2種類のアプローチの適用性を検討することは重要であると考えられる。本研究では第3章から第6章において計画問題とそれに適する応用ということから検討を行うが、本章ではまずこれまでの研究成果を整理するとともに、実用上の各種問題点について検討を行うことを目的としている。

2-2¹⁾ ファジィ理論の土木計画への応用についての整理と展望

2-2-1 ファジィ理論と土木計画

ファジィ理論は1965年に、L.A.Zadehがその基本的概念を提唱してから20数年がたった。現在では、ファジィ理論に関する国際学会（IFSA）も設立され、その研究の範囲についても成果が整理されてきており、新しい現実問題への実用的展開が試みられている。こうした、研究内容の整理に伴って、海外はもとより国内における学術図書も多く刊行されるようになり、ファジィ理論の基本的な知識を得ることが容易となってきた。¹⁾⁻¹⁴⁾

土木計画の分野においては、ファジィ集合の各種理論が発表され始めた比較的早い時期からその適用が検討されてきている。ここでは、ファジィ理論の方法論の概観を行い、これまでの土木計画におけるファジィ理論の適用を取りまとめる。最後にこれらを検討し今後のファジィ理論の適用の方向性について述べる。

ファジィ理論はいくつかに大別することが可能であるが、その具体的方法論と土木計画分野での適用性の関係から表2-1のように取りまとめることができる。ここでの方法論

表2-1 ファジィ理論の方法と土木計画での適用

分 類	主要な具体的手法	土木計画適用分野
ファジィ集合の基礎理論	<ul style="list-style-type: none"> ・ファジィ数 ・拡張原理 ・ファジィ確率 ・ファジィ統計 	<ul style="list-style-type: none"> ・計画数理 ・システム分析 ・社会経済分析評価 ・地域都市計画
ファジィOR	<ul style="list-style-type: none"> ・ファジィ線形計画 ・ファジィ動的計画 ・ファジィ整数計画 ・可能性回帰分析 ・ファジィ数量化理論 	<ul style="list-style-type: none"> ・交通需要分析、予測 ・交通網計画 ・交通配分 ・計画理論
ファジィ推論とファジィ制御	<ul style="list-style-type: none"> ・ファジィ推論 ・ファジィ制御 ・ファジィエキスパートシステム 	<ul style="list-style-type: none"> ・交通流、交通制御 ・計算機支援システム ・交通発生 ・情報処理
その他の手法	<ul style="list-style-type: none"> ・ファジィ積分 ・ファジィクラスタリング ・ファジィ構造分析 	<ul style="list-style-type: none"> ・データ処理 ・交通計画評価 ・意識調査分析 ・環境計画

(注) 適用分野は土木計画学審査分野、年次講演会発表分類よりキーワードを抽出した。

の分類はIFSAにおける研究テーマを参考とし、また適用分野の分類は土木計画における従来のキーワード中から抽出している。また本表中では従来の適用例の含まれると思われる分野を示しており、必ずしもすべての分野の適用が同程度に行われているものではない。

本表からもわかるように、ファジィ理論を統一的に一連の方法論として述べることは難しいが、ここに示した各手法について考えることでファジィ理論の取扱いの範囲を概観することが可能である。

以下では、この分類にしたがって、①ファジィ集合の基礎的理論、②ファジィOR手法、③ファジィ推論とファジィ制御、④その他のファジィ理論という順で具体的な方法と適用について述べることにする。

なおここでは、土木計画に関する過去の研究発表について、土木学会年次学術講演会、土木計画学研究発表会、土木学会論文集における発表を中心として用いている。

2-2-2 | ファジィ集合の基礎理論

ファジィ理論は、Zadeh の提唱したファジィ集合の考え方を基本とする。これは、従来の集合の自然な拡張とすることを目的としている。簡単に言えば、従来の「集合に含む、含まれない」といったように0と1の2値論的に考えられていたものを0～1の多くの値を用いて多値論理として「ある程度含まれる」という内容を表現できるようにしたものである。

[ファジィ集合]

ファジィ集合(Fuzzy Set)は、まず X を全体集合とし x を X の要素とする。 X 上のファジィ集合 A はメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ によって表現される。

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (2-1) \quad |$$

この関数 $\mu_A(x)$ は、 x が集合 A に属する程度を示す。たとえば $\mu_A(x)$ の値が0のとき x は A に全く属さず、逆に $\mu_A(x)$ の値が1のときは x は完全に A に属している。たとえば $\mu_A(x)$ の値が0.6 といった場合には要素 x が集合 A にそれなりに属することを示している。このファジィ集合は一般に以下のような表記法を用いて表現されることが多い。

$$A = \int_x \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が連続量}) \text{ あるいは}$$

$$A = \sum \mu_A(x)/x \quad (x \text{ が離散量}) \quad (2-2)$$

このような、表現方法を用いれば、従来の含む、含まれないの集合（クリスプ集合:Crisp Set）も全く同様な方法で記述することができる。

〔ファジィ数〕

ファジィ集合の定義にしたがえば、一般の「数」に対して、ファジィな表現をもつ「数」も記述できる。

たとえば「5 ぐらい」の数はファジィ集合の表記法によれば以下のようなになる。

$$\{x: 5 \text{ ぐらい}\} = \cdots + 0.0/3 + 0.5/4 + 1.0/5 + 0.6/6 + 0.0/7 + \cdots$$

$$= 0.5/4 + 1.0/5 + 0.6/6 \quad (2-3)$$

（メンバシップ値 0 の要素は省略可）この表記法によれば、従来の数も同様に示すことができ、たとえば以下のようなである。

$$\{x: 5\} = \cdots + 0.0/3 + 0.0/4 + 1.0/5 + 0.0/6 + 0.0/7 + \cdots$$

$$= 1.0/5 (= 5) \quad (2-4)$$

これはファジィ集合が従来の集合を包含した形で定義されていることを示すものである。また上記の表記法で示される $\{x: 5 \text{ ぐらい}\} \left(= \sum \mu_A(x)/x \right)$ のような形で表現される数を「ファジィ数」とよぶ。

〔拡張原理〕

ファジィ集合の関数、あるいはファジィ集合同士の任意の計算を行うために次の拡張原理が定義されている⁵⁾。これは上記の表記法を用いると、

$$f(A) = \sum_{i=1}^n \mu_i / f(x_i) \quad (2-5)$$

ここに、 A : ファジィ集合

$f(A)$: 任意の関数

と定義される。この原理によりファジィ数の演算が可能となる。たとえば、あるファジィ数 A を

$$A = \sum \mu(x_i)/x_i \quad (2-6)$$

とし、 $f(A)$ を「2乗」とすると、ファジィ数 A の2乗 A^2 は以下のように計算することができる。

$$f(A) = A^2 = \sum \mu(x_i)/(x_i)^2 \quad (2-7)$$

すなわちファジィ数の演算では個々の数に対して定義された演算を行い、このときの各計算結果のメンバシップ値はもとのメンバシップ値によって規定されることを示している。

さらに複数のファジィ数の演算もこの原理を用いて行うことができる。すなわち2つのファジィ集合 A 、 B に対して、以下のように定義される。(ここで \wedge : min)

$$f(A, B) = \sum_{i,k} (\mu_A \wedge \mu_B) / f(x_i, x_k) \quad (2-8)$$

たとえば、さきの「5ぐらい」(3式)と「2ぐらい」($=0.7/1+1.0/2+0.4/3$)の和を求めると

$$0.5/5 + 0.7/6 + 1.0/7 + 0.6/8 + 0.4/9 \quad (2-9)$$

$$= [7 \text{ ぐらい}]$$

となり人間の認識に近い演算が行えることがわかる。

このときの「ファジィ数」の演算での相互の関係を図示したものが図2-1である。このようにファジィ数同士の演算を行うと一般に広がり¹⁵⁾の増加したファジィ数が得られることがわかる。ここで用いた「拡張原理」が、現在のところファジィ集合の演算での理論的



図2-1 ファジィ数の計算例

な展開の主要な結論である。これによって、ファジィ数の演算の統合的解釈が可能となり、従来の数（Crisp 数）での各種の議論がファジィ集合にも拡張して用いることができる。しかも、従来の方法での結果と相反するのではなく、内包する形で定義されていることから有効であるといえる。

こうしたファジィ数を用いて従来の基礎的な各種理論の拡張を試みたと例として、ファジィ確率、ファジィ統計などの方法論をあげることができる。土木計画の分野において、黒田・長尾は上記のようなファジィな考え方をを用いて、不確実性下の意思決定問題の取扱いについて理論的検討を行っている¹⁶⁾。ここでは、ファジィ確率を用いて、従来の統計的方法の拡張に関する基礎的な理論が整理されている。この方法を代替案評価に用いた例が黒田・曾根によって示されている¹⁷⁾。石田は、代替案の総合評価に際して、ファジィな量を用いた方法論的検討を行っている¹⁸⁾。また石田・平野は同様の方法を多様な住民意識による評価に用いており、特に住宅地環境、交通環境の評価分析を行っている¹⁹⁾。永野・金安は一対比較法などの評価手法にファジィ性を導入し環境評価などに用いることを提案した^{20), 21)}。また同著者らは、「拡張原理」によるファジィ演算を用い従来の多属性効用理論の拡張を行い、これを水道システムの評価に用いている^{22), 23)}。ここでのファジィ概念の導入は厳密な数値のみならず「だいたい x 」といった評価が可能となり妥当な評価ができるとされている。さらにファジィな考え方を換地における土地利用計画に用いた例が中川によって示されている²⁴⁾。交通の分析にもいくつか例があり、内田・黒田はファジィ情報を用いた意思決定過程を用いて、道路ネットワークのルート選択問題の定式化の提案を行っている²⁵⁾。また木下らはファジィ数を用いた「拡張原理」による演算に着目し、交通機関選択の問題において従来のロジットモデルのパラメータ推計結果を用いて、ファジィ表現にすぐれたファジィ量を得る方法を検討した¹⁵⁾。最近では、高速道路の情報処理の分野で、ファジィな数を用いて、利用者の視点を考慮した妥当な交通情報を提供しようとする井上らによる試みがある²⁶⁾。

これらの研究例は、いずれも従来の数に対して、「ファジィ数」の考え方をを用いた方法である。すなわち従来の多くの方法論に対して、ファジィ数を用いることで人間的な判断を含み、同一の議論を行うことができる。したがって、ここで述べた確率、統計といった方法論的展開はもちろん、既存の各種手法のファジィ性の導入において重要な役割を果た

すものである。今日では、ファジィ集合論についての数学的な検討は一部の数学的興味をもつ者によって研究が行われているが、メンバシップ関数など興味深い話題についても検討がすすんでいる。

2-2-3 ファジィOR手法

ファジィORとはOR（オペレーションズリサーチ）へファジィ性の導入を行ったものである。これは1970年にR.E.Bellman（動的計画法で著名）とL.A.Zadehが、ファジィ環境における意志決定として、代替案の集合 X 上にファジィ目標（fuzzy goal）とファジィ制約（fuzzy constraints）が与えられた際の意志決定に関して検討を行ったものが端緒である。ここでファジィ目標 G とファジィ制約 C は、それぞれメンバシップ関数 μ_G, μ_C によって定義される代替案の集合 X 上のファジィ集合である。

このとき、ファジィ目標とファジィ制約を統合した決定集合を定義する必要がある。BellmanとZadehは、ファジィ目標 G とファジィ制約 C を同時に満たすことを考慮して、ファジィ決定（fuzzy decision） D を、ファジィ目標 G とファジィ制約 C との共通集合と定義した。

すなわちファジィ決定 D は、

$$D = G \cap C \quad (2-10)$$

であると定義され、そのメンバシップ関数は、

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x) \quad (2-11)$$

である。一般に複数個のファジィ制約が存在する場合への拡張は容易に行うことができる。 G_1, G_2, \dots, G_n をファジィ目標とし、 C_1, C_2, \dots, C_m をファジィ制約とすれば、ファジィ決定 D は、

$$D = G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m \quad (2-12)$$

と定義され、このメンバシップ関数は以下のものである。

$$\mu_D(x^*) = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (\mu_{G_i}(x), \mu_{C_j}(x))$$

$$= \min(\mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_n}(x), \mu_{C_1}(x), \dots, \mu_{C_m}(x)) \quad (2-13)$$

ファジィ決定 D における意志決定としては、 D に帰属する度合を最大にするような x を選ぶという最大化決定が提案されている。^{1),4)} すなわち、

$$\mu_D(x^*) = \min_{x \in X} \mu_D(x) \quad (2-14)$$

となるような x^* を求めるものである。ここで、このような x^* は存在しない場合もあれば、無数に存在する場合もある。またこの最大化決定の他に「凸ファジィ決定」や「積ファジィ決定」などが提案されている。

以上の定式化はファジィな考え方をオペレーションズリサーチにおいても用いることを考えたもので、数理計画に属する各方法はファジィ的な定義が可能となる。ファジィ線形計画、ファジィ動的計画、ファジィ整数計画などが多く定式化されている。また、その他のOR手法としては、いわゆる多変量解析法のファジィ化としてファジィ回帰分析（可能性回帰分析と総称されている。）ファジィ数量化理論、ファジィ判別分析などがある。

こうした方法の多くは、従来一般の数理計画的問題として定式化してきた土木計画の各問題には基本的に適用可能であり、この点からいくつかの研究例がある。吉永・樗木は、簡単な2経路の交通経路選択問題に関して、待ち行列などのファジィ制約付きの線形計画問題としてとらえ具体的な定式化を行っている²⁷⁾。秋山は都市高速道路でのLP制御を交通容量のファジィ性から見直し、ファジィLP制御として制御効果の検討を行っている。この結果従来の方法に比べて若干の余裕を考慮した制御結果が得られるとしている²⁸⁾。木下らは、ファジィ線形回帰モデルを機関分担モデルとして用いることを提案している。これは機関分担率のファジィ数としての推定を目指したものである¹⁵⁾。

以上のように、本来ORの方法によって定式化できる問題は、ほとんどの場合ファジィな取扱いが可能である。しかし実際には、各種のファジィ性の導入方法があり、たとえばLP問題のような場合を考えても、①目的関数のファジィ化、②制約条件のファジィ化、③係数のファジィ化をそれぞれ考え、定式化することが可能である。したがっていかなる形を用いるかは、個々土木計画の問題によって検討する必要がある。またさらに第3の例のように、ファジィな量として決定値が得られる場合の取扱いを検討することが必要であ

る。

この分野は、従来のOR手法のファジィ論的展開、特に計算方法の開発を中心に行われているため、適用性についての検討はどちらかといえば不十分である。したがって、各OR手法にファジィ性を導入したことによって得られる解の長所、方法論的特徴についての議論を行っていくことが今後重要であると考えられる。

これまでの研究では、ファジィ数量化理論、可能性回帰分析、ファジィ判別分析などの各種方法は、その長所を十分に生かした適用が少ないが、今後土木計画分野の各種問題解決においても有効であると考えられる。

2-2-4 ファジィ推論とファジィ制御

現在のファジィ理論研究のひとつの大きな課題はファジィ推論とファジィ制御である。ファジィ推論は、Zadehによって近似推論 (approximate reasoning) と呼ばれ、2値論理で構成されていたこれまでの推論をファジィな推論とすることで、人間の推論過程を近似的に表そうとするものである。

ファジィ制御は、いわばファジィ推論の実用的適用でありとくに知識工学の分野で従来から作成されてきたプロダクションシステムを模範として推論ルール群を用いて制御判断を記述するものである。

[ファジィ推論]

ファジィ関係と推論について述べる。ファジィ集合AとBのファジィ関係Rとは、たとえば「AとBは良く似ている。」などの両者の関係を表現するファジィ集合である³⁾。具体的には、

$$R = \int_{x,y} \mu_R(x,y)/(x,y) \quad (2-15)$$

のように表現されるが、このメンバシップ関数 $\mu_R(x,y)$ は、 $\mu_A(x)$ 、 $\mu_B(y)$ の二項関係によって決定される。 $\{x: 5 \text{ ぐらい}\}$ ((4)式) に対して、 $\{y: 4 \text{ ぐらい}\}$ を示す $\mu_B(y)$ を

$$\sum \mu_B(y)/y = 0.4/3 + 1.0/4 + 0.4/5 \quad (2-16)$$

のように定義すれば、この $\mu_A(x)$ と $\mu_B(y)$ を用いて、ファジィ関係を示す $\mu_R(x, y)$ は、たとえば

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \quad (2-17)$$

のように示すことができ、この $\mu_R(x, y)$ で「 x : 5 ぐらいのとき y : 4 ぐらい」という関係が保存される。したがってファジィ集合 B は以下の計算で得られる。

$$B = A \circ R = \int_y \sup [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \quad (2-18)$$

ここで \circ : max-min 計算, \sup : 上限

この演算は論理的な関係「If x is A then y is B 」(もし x が A ならば y を B とする。)を表現するものである。「 x is A 」とは異なる入力「 x is A' 」によって得られる推論結果「 y is B' 」はつぎのようにして求めることができる。

$$B' = \int_y \sup [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)] / y \quad (2-19)$$

これは、ファジィ関係を表現するためのメンバシップ関数 $\mu_R(x, y)$ を $A \rightarrow B$ の関係として決定しておけば、「 x is A' 」の状態を示すメンバシップ関数 $\mu_{A'}(x)$ から推論結果として y の状態を示すファジィ集合 B' が求められることを示している。このようなファジィ推論は図 2-2 に示すようにメンバシップ関数として表現されるファジィな入力変数

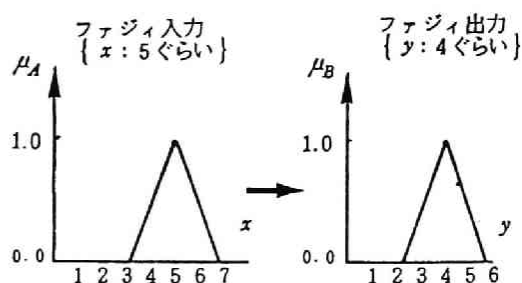


図 2-2 ファジィ推論の概念図

(fuzzy variables)により出力側にもひとつの分布を持つファジィな変数が得られるものである。

[ファジィ制御]

ファジィ制御は、さきにのべたようにファジィ推論の制御への適用である。したがって基本的方法論は同様である。ただし対象を「制御」とすることから、一般に入出力はファ

ジでない数値である。ファジィ集合が従来の集合も包含していることから、ファジィ推論においても入力情報である A に $[x=5]$ などの普通の数（クリस्प入力）が可能であり、ファジィ制御等への適用ではこの形を用いている。すなわち、制御の判断は「 x が大ならば y は大」といったファジィ推論の形で表現され、入出力値は確定値を用いることができるということである。

したがって、従来入出力関係が $y=F(x)$ の関数として表現された問題が、ファジィ推論型のルール群として表現されることから、判断内容の明確化、ヒューリスティックな内容変更が可能となる点で有意義である。

ファジィ制御はすでに多くの分野で開発研究が進み、実用的システムもいくつか見られる。とくにファジィ制御の創始者の存在である E.H.Mamdaniが、交通制御の問題（信号制御）に用いていることは興味深い³⁰⁾。またわが国においては、仙台市の地下鉄の自動運転、浄水場の制御などに積極的に取り入れられている¹¹⁾。本論文においては、第3章でこの方法について詳細に述べられる。

土木計画の分野では、加賀屋らが道路粉塵に対する意識構造をモデル化するため、その思考過程をファジィ推論で表現しルール群を用いて記述を試みている³¹⁾。またファジィ推論の具体的な説明とその応用に関しては、佐佐木・秋山による交通行動をファジィ推論として表現したものに詳しい。ここでは、交通行動の判断をモデル化し、最終的に人間の判断結果をメンバシップ関数の分布として表現している³²⁾。

またファジィ制御では、都市高速道路の交通制御の注目して同手法の適用を試みたのが、佐佐木・秋山らのファジィ流入制御モデルである。これは、実際の交通制御をモデル化したものであり、基本的方法に忠実にモデル化を行っている^{29), 33), 34)}。またファジィな推論からいわゆるエキスパートシステムへの応用、ヒューリスティックな方法の導入にも目が向けられるようになってきている。前田らによる応用例もこのひとつであるといえよう³³⁾。

ファジィ推論は、現在のファジィ理論のなかでも最も有力な方法と考えられ各種の理論的研究もすすんでいる。とくに従来のエキスパートシステムにファジィ性を導入してこうとする動向もある。すなわち、知識工学を用いた方法論と人間の判断におけるファジィ性をうまく融合し適用性を向上させようとする試みである。今後、土木計画の分野においても、ファジィ推論で記述可能な問題の抽出とその思考過程記述の容易性、あるいは推論結果の明示性を生かした応用への展開を模索していくことが重要であると考えられる。

2-2-5 その他のファジィ手法

以上に挙げなかった方法論の他に、主要なものとして、評価に用いるファジィ積分の方法、クラスター分析の一般化であるファジィクラスラリング、ISMを一般化したファジィ構造分析手法(FSM)などがその適用性に優れていることから実際の適用がいくつか見られる。

[ファジィ積分]

ファジィ測度を一種のウェイトとして総合的評価を行う場合ファジィ積分が用いられる。ファジィ積分は具体的には以下のように定義される。

集合 X に対して、関数 $h: X \rightarrow [0, 1]$

が与えられるとき、 X の部分集合 F 上のファジィ積分は、 $F' \subset F$ に対して以下のように定義される。

$$\int_F h(x) \cdot g(\cdot) = \sup_{F' \subset F} [\inf_{x \in F'} h(x) \wedge g(F')] \quad (\inf: \text{下限}) \quad (2-20)$$

すなわちこの積分により各評価 $h(x)$ をウェイト g で統合化(積分)するわけである。このファジィ積分は無限集合を前提としているが、われわれが実際に直面するような有限集合にも定義される。

前述の定義において $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ とすれば $h(x)$, $g(x)$ もそれぞれ $h(x_i)$, $g(x_i)$ で示される離散変数となり有限個であるので、(20)式は以下ようになる。

$$\int_x h(x) \cdot g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [(\bigwedge_{j=1}^i h(x_j)) \wedge g(X_i)] \quad (\wedge: \text{min}) \quad (2-21)$$

なおこのとき実際の計算のために、あらかじめ

$$h(x_1) \geq h(x_2) \geq \dots \geq h(x_n) \quad (2-22)$$

のように並べておけば、部分集合 $X_i = \{x_1, \dots, x_i\}$ に対してつねに

$$\bigwedge_{j=1}^i h(x_j) = h(x_i) \quad (2-23)$$

が成立するので上式は次のように書き直すことができる。

$$\int_x h(x) \cdot g(\cdot) = \bigvee_{i=1}^n [h(x_i) \wedge g(X_i)] \quad (2-24)$$

これは定義どおり、 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ のすべての部分集合 (2^n 個) に対して、演算を行わず n 回の比較計算でよいことを示している。

それぞれの項目の持つ意味は以下のように考えられる。

x_i : 評価要因 i の属性値

$h(x_i)$: 評価要因 i の属性値が x_i のときの評価に対する望ましさの度合 (換言すれば x_i が高い評価を与える属性値の集合の帰属する度合を示すメンバシップ関数)

X : 評価要因の全体集合 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$

X_i : 評価要因の部分集合 $X_i = \{x_1, \dots, x_i\}$

$g(X_i)$: X_i について先験的な重視度 (評価上限値)

λ : 相互作用乗数、評価要因の重複程度を示すパラメータ

μ : ファジィ積分値、要因に関する評価値 $h(x)$ を総合化した評価値

したがってファジィ積分によって与えられる総合評価値 μ は個人が各々の項目についてメンバシップ関数の値 $h(x_i)$ として評価したものを、ファジィ測度によって総合化した値である。また、このとき用いられる演算から max-min 的な思考過程をもつ評価であることがわかる。

本多らはファジィ積分の演算過程が人間の意志決定過程をモデル化すると考え、個人の経路選択モデルを提案している³⁶⁾。佐佐木らも同様な選択に関するファジィ積分を都市高速道路の迂回現象の検討に用いている³⁷⁾。また本多らは、ファジィ積分を評価に用いることを考え、土木施設評価手法を示している。ここでは、土木施設のサービス水準と主観的総合評価との関係を中心に検討を行っている³⁸⁾。同様な試みは石田らも行っており、バス導入問題に対する住民の意識構造をファジィ積分の演算過程を用いてモデル化しようとするものである³⁹⁾。また飯田らは代替案の総合評価手法としてファジィ積分手法をとりあげ、従来からの方法である多規準分析法、多属性効用関数法と評価結果の比較を行って、手法の特徴を整理している⁴⁰⁾。

[ファジィクラスタリング]

ファジィクラスタリング手法は、統計的手法のひとつクラスタリング手法の拡張である。

従来の方法では、明確な境界線を用いて、データ集合をいくつかのクラスタに分類する。しかし、実際には境界部に存在するデータをいずれか1つのクラスタのみに完全に帰属させることは困難な場合が多い。

そこで帰属度を $\{0,1\}$ の2値から $[0,1]$ に拡張して中間状態も認めることにし、境界部のデータは、複数のクラスタに少しづつ帰属することも許されるように定式化したのがファジィクラスタリング手法である。これは自然な考え方であり、多くのアルゴリズムが発表され理論的にも整備されてきている¹¹⁾。

基本的には、扱うデータ集合を $X = \{x_j\} (j=1 \sim n)$ 、クラスタ数を c とすると、ファジィクラスタリングの最終結果は1つの分割行列 U

$$U = [u_{ij}]_{i=1 \sim c, j=1 \sim n} \quad (2-25)$$

で表現することができる。この u_{ij} は $[0,1]$ の数値をとり、 j 番目のデータ x_j が第 i クラスタに帰属する度合を表している。ただしここで、 u_{ij} は以下の2つの制約を与えるのが一般的である。

$$\textcircled{1} \quad \sum u_{ij} = 1 \quad \text{for } j = 1 \sim n \quad (2-26)$$

$$\textcircled{2} \quad \sum u_{ij} > 0 \quad \text{for } i = 1 \sim c \quad (2-27)$$

(25)式はメンバシップ値の規格化、(26)式は帰属度が正で与えられることを示すものである³⁾。

このような条件下で妥当な u_{ij} を求めることを目的とするが、実行指標となる目的関数は多く存在する。基本的にはデータより与えられる距離行列（あるいは類似度）との整合をとるための関数最小化が用いられ、この点は従来の方法と同様である。また解法は「重みつき最小二乗法」が一般的である。

後藤・石田は道路分類のための手法としてファジィクラスタリングを用いている⁴¹⁾。ここでは、アンケート調査結果を用いた検討が示されている。佐佐木・秋山はファジィクラスタリングを用いた道路建設に対する住民意識の分析を行っている⁴²⁾。3つのファクタによって地域住民の意識を分類するしているが、複数の意識の混在状態の表現にこの方法を用いている。

[ファジィ構造分析]

ファジィ構造分析手法 (Fuzzy Structural Modeling, 以下F S M手法と略記する。) は、従来の構造分析手法であるI S M法と同様な取扱いをファジィ関係行列に対しても行うために考案された方法である。

まず構造同定を行う対象システムを、要素の集合体として、 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ とし、要素2項間のファジィ従属行列 A を $\{a_{ij}\}$ と定義する。行列 A は、 $n \times n$ 行列でありその要素 a_{ij} は、

$$a_{ij} = f_r(S_i, S_j) \quad 0 \leq a_{ij} \leq 1 \quad (2-28)$$

f_r は要素間のファジィ2項関係に関するメンバーシップ関数である。すなわち $f_r(S_i, S_j)$ は、 S_i, S_j 間の結合程度を示すものといえる。

またファジィ補集合 \overline{A} のメンバシップ関数 $\overline{f_r}$ と f_r との関係は、

$$\overline{f_r} = (1 - f_r) / (1 + \lambda \cdot f_r) \quad (-1 < \lambda < \infty) \quad (2-29)$$

分析の最初に設定する関係の有無をみるための境界値 $p(0 < p \leq 1)$ を設定し、このファジィ従属行列 A を用いて、次の手順で S の構造を決定する⁹⁾。

①最上層レベル集合の要素に関しては行を消去、最下層レベル集合の要素については列を消去、独立レベル集合の要素については行および列を消去し、要素間の従属関係を示す小行列 (単一ハイアラーキー行列 $A^{(j)}$) を作成する。これはグラフ上で結合していない箇所について、行列から除去することを示している。

②ファジィ構造パラメーター λ の値を設定し、各単一ハイアラーキー行列 $A^{(j)}$ に関してグラフ化する。ここでレギュラー行 (列) は要素間の一意の従属関係を示す。

要素 S_i に対するレギュラー行 $S_k, k = 1, 2, \dots, m$ の消去は

$$a_{\bullet i}^* = a_{\bullet i}^{(j)} \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^m \overline{a_{\bullet k}^{(j)}} \right) \quad (2-30)$$

により、 $a_{\bullet i}^{(j)}$ を $a_{\bullet i}^*$ に置き換えることにより行う。

土木計画の分野においては、構造化を行うことで問題の明確化をはかることに加えて、

各要因間の関係に関連の程度として表し、多様な表現を可能とするための試みがいくつかある。

湯沢らは、社会システムのひとつとして地方都市発展のための問題点の把握にF S Mを用いた構造分析を行っている。ここでは、F S M手法の概要を紹介し、調査結果データを用いて分析を行っている⁴³⁾。また加賀屋は地域環境に対する住民意識を構造的に把握するためにこれを用いている⁴⁴⁾。中西らは、新交通システムのひとつであるリニアモーターカーの導入における問題点の構造化を行っている⁴⁵⁾。加賀屋・山村は、ダム計画の生活環境意識への影響分析を行うために、F S M手法を用いて問題の構造化を行うとともに、これをもとにインパクトの予測を行うためにファジィ関係を導入している⁴⁶⁾。都市圏構造に関する分析にも用いられており、樗木・吉武らは、分析の過程で方法論のひとつとしてF S M手法提示している⁴⁷⁾。また飯田らは、同じく都市圏の交通構造の把握について、交通行動を基準として検討している。特にここでは、秋期と冬期の交通行動の差異がF S M手法によって構造的に把握されている⁴⁶⁾。

ここでは、その他の手法として適用例の多い3種の手法についてのべた。これらはいずれも、①方法論の意味が明確であること、②方法論的には一連の計算手順として独立していることなどの理由からその適用が多いものと考えられる。現在のところ、ファジィ積分は評価問題に、ファジィクラスタリングはパターン認識に、ファジィ構造分析は各種問題の構造同定に用いる場合が一般的である。

ここで注意すべきことは、これらの方法の大半はファジィな計算結果を与えるということである。これまでの研究事例においては、分類や構造化を行うが出力されるファジィな量を積極的に用いた分析は数少ない。0, 1型の割切り型の分類や構造化に対して「程度」を持たせることの意味を十分に活用することで、分析結果に新たな情報を付加することが可能であり、この点応用的な検討の余地が残されているものである。

2-2-6 ファジィ理論応用についての展望

ここまで、土木計画の分野で用いれているファジィ理論を順に概説するとともに、いくつかの適用例について述べた。今後のファジィ理論適用に関しては、いくつかの課題がある。ここでは、重要と考えられる点を以下に簡単に述べる。

(1) ファジィ理論の特徴と理解

ここまで見てきたように、ファジィ理論の本質的な特徴は以下の2点に集約することができる。

- ①0と1の2値的な決定ではなく、連続的な幅をもって表現、演算が可能となっていること
- ②従来の集合による結果と相反するものではなく、これを包含した形であり自然な拡張となっていること

したがって、このような点を生かせる妥当な適用分野を検討すべきであろう。具体的には土木計画の分野において、「余裕」や「幅」をもって意志決定を行うべき問題に適用することが望まれる。特にこの点では、人間の意志が介在する問題は適用性が高いということもできる。

しかし、これまでファジィ理論によって人間の思考過程をモデル化するといっているが、単に意識調査などの解析のみに用いてきたことには問題が多い。これは「人間の思考＝ファジィ」という短絡的な考え方であり、ファジィ理論の目指すところとも異なっている。

このようなことは、十分なファジィ理論の理解の欠如にも起因すると考えられる。一般に「客観的」に対して「主観的」あるいは「決定的」に対して「あいまい」「不確実」という言葉から受けるイメージは必ずしも良いものではない。すなわち、現在のところいわゆる Fuzziness に対する正しい理解が不十分であり、こうした訳語の与えるイメージに影響を受けるということである。

ファジィ理論の理解という点で、とくに注意すべきであるのは、ファジィ理論は「今日と明日では気が変わって行動が変わる。」といった“いいかげんさ”を記述するものではないことである。簡単にいえば、人間の認識に内在する判断の幅（余裕）を表現するものと考えらるべきであろう。そして、この点を理解することでファジィ理論の現実的長所が生かされるものである。

ファジィ理論を用いれば必ず人間の認識が記述できるというものではない。また問題によっては、従来の機械的、数理計画的な処理を用いることで、明解に問題解決がはかれる場合もある。こうした問題にあえてファジィ理論を用いることは不必要なことであり、かえって問題を複雑にする。またファジィ理論は従来の方法の一般化をめざしている。したがって拡張原理などを見てもわかるように、考えられるすべての場合を網羅した計算を実

行する手順を持つ場合が多く、計算効率が良いとはいえない。この点からも、多くの意志決定変数を持つ問題などへの適用は妥当ではない。

そしてこうした幅を持った表現を必要とする分析対象物を即座に示すことは難しいが、今後の検討から問題を整理していく必要があるであろう。

（２）土木計画のハードとソフト

ファジィでない従来の方法は、対象とする問題によっては若干不都合を生じる。たとえば決定論的方法のみで土木計画における諸問題の解決を行うことは、「予算を１円でも越えたプロジェクトは悪い。」「調査データの実績値に完全に一致するモデルが良いモデルである。」といった危険な判断を示唆する場合がある。

一般に土木計画へのアプローチとして、モデルを作成し、実績値との整合を求め相関係数の0.1の増加に努力を費やし、これがモデルの改良と考えられる場合も多くみられる。しかし、これを「あまり大きくは違わない」として、モデルの論理構造についての精緻化を試みることも別の観点から重要なことであると思われる。

土木計画上の問題においても、個人の意志決定、選択過程をモデル表現し、これをもとに交通需要推計、都市地域計画等の資料とする場合も多く見られる。このために人間の思考過程を「人間らしい」ソフトな判断の記述をおこないながら、ひとつの理論的枠組みのなかで議論をすすめるにはファジィ理論は有効な方法論であろう。

またいわゆる「知識」にもとづくヒューリスティックな推論を用いる方法として、知識工学の検討が重要視されているが、昨今では、すでに情報処理等の分野においてエキスパートシステムにおける推論そのものをファジィ推論とする「ファジィエキスパートシステム」構築の兆しもみられる。したがって、ファジィ理論も理論的展開から実用的展開へと移行しつつあるといえる。これは土木計画においても、各種問題のハードな取扱いからソフトな取扱いへの移行の必要性を示唆するものである。

これまでに、ファジィ理論で取り扱ってきた問題を確率論等でも同様な議論を行い、解析できるという意見があるが、残念ながら実際にこれを行った研究例を見いだすことはできない。土木計画における各種問題においても確定的、決定論的なハードな方法を必要とする側面と不確実で決定に余裕を持つソフトな方法を必要とする側面の両者を検討していく必要があるだろう。

このようなことから、従来の方法とファジィ理論を適度に組合せ、融合した方法論の展開がのぞまれる。

以上述べたように、ファジィ理論は「基礎理論」の部分では共通の基盤を持つが、実用的な各方法に対しては個別に開発されたものが多い。したがって、その適用性についての検討と展望も体系的に論ずることは難しい。ここでは最後に土木計画への適用という点からみて、今後重要であり特に期待される話題を以下に整理する。

- ①ファジィ理論を土木計画の意志決定における不確実性の取扱いひとつとして考えることができる。従来の最適化理論を用いた一意な決定に対して、ファジィORなどのファジィ決定は、計画の余裕を考慮している。換言すれば計画に融通性、頑健性（robustness）を導入することができる。すべて計画問題に融通を持たせる必要はないが、逆に判断の厳格さが実用上は妥当な代替案を排除することもあることに注目すべきである。
- ②土木計画では、人々のための計画を目指すことから、「人間の判断」記述しようとする試みは多くみられる。一般に調査データを分析、モデル化するが、この際にファジィな統計的分析やファジィ推論を用いることでひとつの論理構造をもつ行動記述が可能となる。数式モデルも一見論理的であるようだが、たとえば「各要因の線形和から選択する」といった関数を我々の日常的な判断の記述というのはやはり理解しがたい。
- ③近年「パターン認識」という言葉にもあるのように、分析結果など各種情報の表現形態が変化しつつある。また計算機の演算能力の進歩に加えて、数値計算を行うことこそがコンピュータの役割りという考え方も反省されつつある。すでに画像データ処理などではファジィな数量の取扱いが注目されており、各種の情報処理上で人間らしいソフトな扱いのためにファジィ理論を利用していくことが重要となると考えられる。

さきに述べたようにファジィ理論のみが不確実問題の解決方法ではない。また現在のファジィ理論であらゆる問題の解決が図れるものでもない。しかし、ファジィ理論の適用は紋切り形の一刀両断の計画に対し、若干の柔軟性と人間性を与えようとする試みであるといえよう。適用性の一層の向上という点では、今後ファジィ理論自身がさらに体系化され、また新しい進展があることが期待される。たとえばファジィ理論に必要な演算を直接実行するファジィコンピュータが開発途上にあるが、これもファジィ理論の実用性向上から有意義なことである。

そして、わが国の土木工学のなかでは、土木計画学の分野ばかりでなく、構造工学をはじめ他分野でもファジィ理論の適用が非常に多く見られることに注意すべきである。またファジィ国際学会（IFSA）でもファジィ理論の適用の一分野として土木工学（Civil Engineering Application）が挙げられていることも注目に値する。このような、研究動向にも十分に注目し、従来の方法との妥当な結合を考えていくことで一層ファジィ理論の有用性が認められるものと思われる。

2-3 知識工学手法の土木計画への応用と展望

ここでは、知識工学手法の概観を行うために、すでに多くの知識工学の研究から得られた成果をとりまとめる。また土木計画の分野ではなおその応用が行われつつある現状であるので、この点からこれまでの研究について検討するとともに今後のこの研究の発展性について考える。

2-3-1 知識工学手法の概観

（1）知識工学手法

知識工学は人工知能の研究の過程で生まれた学問であり、応用人工知能と呼ばれることもある。「知識」を利用して知的問題解決を実現するための工学である。具体的な成果であるエキスパートシステムと同義に用いられることもある。本研究においても、「知識工学」の実用的な方法という意味で「知識工学的手法」という用語を用いることにするが、これも狭義にはエキスパートシステムを表わすものと考えてよい。以下では、まず知識工学の分野におけるこれまでの研究成果を参考とし主要な部分をまとめることにする。

エキスパートシステムの詳細は第4章において述べられるが、本来エキスパートシステムは、「問題領域のエキスパート（専門家）の知識を利用して推論を行い、十分に複雑な問題を、エキスパートと同等のレベルで解決する知的プログラム」をいうとされている。つまりエキスパートでなければうまく解決できないような問題を、エキスパートと同等のレベルで解決できるための十分な能力をもつことが重要である⁴⁸⁾。

またここで「エキスパート」と呼ばれる専門家は、一般に質的に高度で豊富な専門知識を持つと考えられる。エキスパートの持つ情報は教科書や専門書に記述された客観的なものもあるが、長年の個人的体験に基づく知識が少なくなく、問題解決能力の重要な部分は

後者に依存しているといえる。これは経験的知識あるいはヒューリスティクス (heuristics) と呼ばれるものである⁵⁰⁾。

現代において1つの領域の専門度が非常に高くかつ複雑化し、単独の専門家では問題解決が不可能となってきた場合がある。仮にこの種の問題にエキスパートシステムを応用すれば、複数の専門家の知識を集約できることから、ひとりの専門家よりも優れた問題解決能力を持つという考えかたもある。この考えかたを推しすすめていくと、重要な専門家の退職や転職によって「知識」が失われることに対する解決策としてエキスパートシステムを利用することが期待されるといえる。しかしこれまでの研究成果から考えて、このような考えかたがエキスパートシステムへの期待の一部でもある。このようなことは遠い将来は可能であるかもしれないが、現在の技術レベルでは不可能であると言えよう。

現在のエキスパートシステムで使われている知識表現は表層的なものであり、推論制御も同様に表層である。例えば、プロダクションシステムで用いられる推論は

IF $A \mid B \mid$ THEN $C \mid \mid$

条件 $A \mid$ と $B \mid$ が成立すれば結論 $C \mid$ がいえるというものである（これについては、第4章以降に詳細に述べる）。形式上、このルールは $A \mid$ 、 $B \mid$ と $C \mid$ を結びつけているが、なぜそうなのかという論理的な内容については言及してはいない。プロダクションシステムではすべての知識がこのような形式のルールで表現される。このようなルールが一般のシステムにおいては数百から数千集まって「知識ベース」を構成するが、推論は単にこのようなルールの連鎖を作っていくって最終的な結論をだすにすぎず、連鎖を逆にたどることによって推論のみちすじの説明を行うわけで、これ以上のことはできないということになる。

このような知識の表現に基づくシステムのことを表層システム (surface system) と呼び、物事の基本的原理や法則に基づくシステムを深層システム (deep system) と呼んで区別する場合がある。現在各分野で開発されているものは、この表層システムであるといえる⁵⁰⁾。

ルールによる表層システムの能力をあげるには、ルールを詳細化しかつ網羅的に十分な数にする以外にない。このような力ずくなやりかたであらゆる状況をカバーしつくすことは無理である。この点だけがエキスパートシステムの持つ問題ではないが、「知識」の利用という意味から大きな課題である。しかし、このような問題が今後の知識工学の進歩に対して全く解決されないということは考えられないであろうし、また「知識」を正確に記

述するという学問的興味からはこうした問題の解決は非常に重要であるが、必ずしもこれが、実用的エキスパートシステムの存在を否定するものではなく、特に土木計画への応用という点では、現行レベルのシステムであってもその利用可能性は高いと思われる。

(2) エキスパートシステム構築方法

つぎに、エキスパートシステムの適用性を考えるために、現在一般的に3種類に大別して示されているエキスパートシステム構築方法について述べる。^{49),50)}

①汎用言語を用いる方法

この方法は汎用プログラミング言語であるLISP, PROLOG, FORTRAN, Cなどを用いて応用エキスパートシステムを直接開発する方法である。初期のエキスパートシステムは、ほとんどがこのような方法で開発されている。この方法で応用エキスパートシステムを開発するには、システムのすべての部分をプログラムすることになるので大変な手間を必要とする。すなわち知識の表現形式を決め、知識ベースを設計し、知識ベースを構築するためのツールである知識ベースエディタを設計し、知識ベース内の知識を利用した推論実行のための推論方式を決め、このための制御メカニズムを設計し、これらをすべてプログラム化しなければならない。これ全体が完成して、初めて応用エキスパートシステムの開発に着手できることになる。あるいは、応用エキスパートシステムの開発のプロセスとして、そのようなプログラムの開発を行うと考えることもできる。このようなことは1度の設計でうまくエキスパートシステムとして完成されとは考えられず、試行とテストの繰り返しの連続となるからである。このような方法を用いることは、エキスパートシステムの基本的な方法の理解と妥当な問題設定を考えていくうえで有効な方法である。

②エキスパートシステム開発ツールを用いる方法

第2に考えられるアプローチは一般によく用いられる「開発ツール」あるいは「エキスパートシェル」などと呼ばれる一種の言語を用いる方法である。いわゆるルール形式で「知識」を表すプロダクションシステムは、いずれもこのようなアプローチを意図して開発された知識表現言語を用いている。これを用いて応用エキスパートシステムを開発する場合は、極端に言えば、単に判断の対象となる項目と、判断のためのルールを定義するだけでよい。この作業においても、ふつう対話型の知識ベースエディタを用いて比較的容易に行うことができる。また推論制御部分やユーザ・インタフェースはすでに作りつけとなっ

ているので、「知識」を定義すれば直ちに推論を実行してみてもうまく働くかどうかを確認することができる。ここで、もしまずい点が発見できたら、直ちに知識ベースエディタのモードへ切り換えて、部分的な知識の変更や追加を行い、再度推論モードへ切り換えてテストするということができる。

このアプローチの利点は、応用エキスパートシステムの開発が非常に容易にできるということである。人工知能が産業界へ波及し始めたのも、プロダクション・システムをはじめとする、簡易型の知識表現言語およびツールが入手可能となったことによる。ただし、これらの言語は、FORTRANやLISPのように汎用性は高くないので、言語設計者の定義する方法論の中でシステムの開発を行うという点がひとつの制約となる。

③知識表現言語を用いる方法

より汎用性の高い知識表現言語を用いて応用エキスパートシステムを開発するケースを示す。たとえば、フレーム型知識表現言語では、知識の表現形式ばかりでなく、推論制御メカニズムさえも利用者が設計できるようになっているので、いろいろなタイプのシステムを実現できる。しかし、これは逆に利用者の負担ともなる。したがって、このような場合には、AIの専門家がかならずこの言語を使って、応用エキスパート・システムの骨組みを作成し、次にこの骨組みを用いて各種の具体的知識を表現することによって、応用エキスパート・システムを開発するという方法が妥当である。たとえば、第2のアプローチでは、すでに開発されたプロダクション・システムなどを使うので、特定の応用に関してはある種の妥協を強いられることになるが、この方法では、その応用に合わせたプロダクションシステムを設計することが比較的容易である。

このような言語を用いれば、かなり複雑な知識ベースシステムの開発が比較的スムーズにできる。しかし、いずれにしてもフレーム型知識表現言語に代表される汎用性の高い言語は、コンピュータ科学者またはAI研究者と呼ばれる専門家向きのツールであると考えられる⁵⁰⁾。

以上に示したように、エキスパートシステム構築の方法そのものが現在開発途上のものであり、いずれの方法が良いと結論づけることは難しい。特に土木計画における利用を考えると、かならずしも最新の計算機技術を取り入れることを目的とはしていないため、②の方法が最も主要であり、また①の方法をとるものでも基本的なプロダクションシステム

を構築している場合が多いのが現状である。具体的には次節で検討する。

2-3-2 土木計画における知識工学手法の応用

土木工学の分野においてもハードであるとされている構造工学の分野では、すでに具体的に詳細な検討が行われており、数多くの適用例が発表されている。これに対して進歩的な視点から各種の検討を行うべき計画分野では、比較的適用例が少なく、進歩的な考え方に立ち遅れているのかもしれない。このような原因を考察してみよう。まず計算機の進歩の過程を考えると、これはコンピュータを単なる「高速演算プロセッサ」と同義に考えており、やはり正しい認識が乏しいことによるといわねばならない。現代の特にわが国においては、いわゆる物質文明の進歩が、ある程度頂点を向かえた時代にいたって、ハードな時代からソフトな時代へと変わってきたのである。これからは、高度な情報化の時代が到来したと考えることができる。もちろん計算機の技術も進歩したのである。そこで現在においては、計算機においての人間の発想に近づく必要があるのである。こうした社会の現象に対する認識が不足しているのかもしれない。

もちろん土木計画の分野においてもすでに「コンピュータ支援システム」として計算機の利用は十分に検討されていることである。しかしここにおいても計算機の利用方法に、いわゆる高速の数値演算を行う道具としての認識が多く広まっており、なおこれこそが計算機の重要な役割であるという意識の存在することに起因するのであろう。こうした計算機に対する認識も応用的分野においては、必ずしも不適切であるとはいえない。これまでの土木計画の研究においては、数量的モデルとその解法あるいは、実証的各種データの統計的処理が中心的な部分を占めていたことから、複雑で大量な演算を実行できることは、研究そのものを実用的なものに変革し、それまで研究対象とはならなかった大規模なシステムを取り扱うことを可能にしたからである。

ただ今日、情報処理の必要性は土木計画においても重要視されるべきであると思われる。情報の変化とともに社会体制そのものが変化しつつあるのである。この点に目をむければ、必ずしもエキスパートシステムの利用が意味のないことではない。このような適用を考えることで今後の方向を知ることも可能となるからである。ここでは、これまでの土木計画における研究を整理する。土木計画への適用という意味からは、その数は限定されるが、対象としたものは、土木計画研究発表会、土木学会論文集、土木学会年次講演会、を主要

な参考として概観することにする。

土木計画の分野で開発されている具体的なシステムとしては、佐佐木・秋山による交通制御の記述のためのプロダクションシステムが紹介されたものが端緒であろう。^{51), 52)} この研究は、ファジィ交通制御モデルを一般的な形に改良することから発展し、その後「交通制御エキスパートシステム」として開発されている。この成果については、本論文の第4章においても知ることができる。

また、秋山・堀田によって交通情報の処理という点から研究が行われており、高速道路の交通情報板の制御という問題にエキスパートシステムを用いている。^{53), 54)} この研究では、パーソナルコンピュータを用いたシステムであり、やはり、LISPによって開発されている。本論文第5章はこれに対応している。

また川井らによる研究では、新設道路による沿道立地の影響を予測するために、土地利用決定に関する分析を行うとともに、これを予測のための知識ベースシステムとして整理している。⁵⁵⁾ 具体的な方法論としては、パーソナルコンピュータ上のエキスパートシェルを用いてシステム構築を行っている。

大橋らの研究においても土地の有効利用を行うための計画支援システムを構成している。ここでは、汎用コンピュータ上で構築用ツール（ESHELL）および、UTILISPを併用しているとされている。⁵⁶⁾ MYCINなどの初期のエキスパートシステムを考えるとコンサルティングシステムとして作成されている点は重要である。

いずれの研究も、その初期段階にあるといえ、今後の研究が期待されるところである。

エキスパートシステムの利用に対して懐疑的な意見が多く存在するのは、その方法論の現状からみて、必ずしも不適切なことではない。これは、研究レベルにおいては、知識（knowledge）とは、意志決定の過程に直接影響を与える情報であり、効果あるいは機能として把握されるものと考えられる。知識を中心としたものが重要視されてきている。

最近では、土木学会の第12回電算機利用に関するシンポジウムにおいても「エキスパートシステムの将来性」が述べられている。⁵⁷⁾ ここにもあるように、普遍的に有効な方法があるわけではなく、対象とする問題との適応関係を十分に考慮する必要がある。

2-3-3 | 土木計画における応用での問題点

土木計画への知識工学手法の適用は以上に見てきたように、なお初期段階であり今後の

進展が望まれる状況である。土木計画分野におけるエキスパートシステム適用に対して難しいことのひとつとして、コンピュータプログラミングの困難さがあると思われる。すなわちエキスパートシステムには、これまで見たようにエキスパートシェルを用いる方法もあるがそれぞれ独自にプログラム開発を行うことも可能である。まず土木計画の分野で行うべきことは、やはり土木事業における問題解決の方策を探索することであり、計算機のプログラム技術を向上させることではない。すなわちエキスパートシステムを構築するといっても、このプログラミングを行っただけでは土木計画としての研究意義は大きくないと考えられることが多い。したがって、こうした開発に注がれる努力は少ないものとなり、当然技術的進歩は小さいものとなるのである。

これは実際にはいろいろな方法のプログラムをFORTRANなどの言語を用いて作成することにもかなりの努力を要するのであるが、これらの努力あるいはプログラム技術の開発について土木計画分野ではあまりに評価が低いことも問題のひとつである。

またエキスパートシステムが適用されにくいもうひとつの点は「知識工学」の実用的方法論とすべきエキスパートシステムが実に多様な点である。いかなるシステムをエキスパートシステム呼ぶかということが問題となるように、逆にいえばエキスパートシステムには確定した方法が存在しないのである。したがってこの方法論が統一的でないことは、そのシステムの適用性や限界についても十分に言及されることがなく、したがってエキスパートシステムを用いることの意味が明確にされにくいのである。これは、その適用限界性にも関係する。つまりエキスパートシステムを用いることによって、どの程度の問題がいかなる形で解決されていくのかを知り、これを整理していく努力を行う必要がある。

2-3-4 知識工学手法応用への期待

これまで見てきたように、デモシステムのようなエキスパートシステムは比較的容易に作成することができるが、確かに本格的なエキスパートシステムを構築し、特定の分野の問題解決に実用的に用いることができるようにすることは、現在のところ非常に困難である。

しかしたとえデモシステムというべきものであってもエキスパートシステムの理解を助けるため、あるいは基本的な構造を知り、知識工学の応用的側面を知るためには必要である。また既存の各種エキスパートシステムと同規模のものであっても確かに機能的限界は

あるが十分に用いることができるはずである。したがって、前述したように「知識工学手法」適用可能性を知ることには十分である。これまで土木計画分野で行われてきたように、否定的な部分のみを追求していたのでは、実は有用な部分を持つ方法であってもこれを無視してしまうことになる。この意味で発達途上にあるエキスパートシステムであっても具体的な適用を行っていくことでその改善を期待することができるのである。

また、知識工学手法を用いていくうえで、エキスパートシステムの必要なルールをまとめていくことで十分に問題が検討されていくことがある。つまりエキスパートシステムは思考過程のひとつのモデル化であるからこれを用いることで、解決すべき問題の判断構造を検討することができるのである。

さらにエキスパートシステムが適用できる分野においては、その適用分野がまったく異なっても、実際に推論を行う部分がほぼ同じということは十分考えられることである。これは、エキスパートシステムでは「汎用」ということを考えるために「知識ベース」の部分の変更を中心に行えば、システム全体の機能を変更できる機能があることを用いることができる。いわばエキスパートシステムの長所のひとつであるが、これまでは、残念ながら方法論的な進歩がないものとして受け入れない傾向が見られる。こうした考え方を改めその適用の有効性と限界を併せて考えることで、エキスパートシステムの利用性も向上して行くであろうと思われる。

2-4 結 語

本章においては、ファジィ理論と知識工学手法について土木計画分野への適用という観点からその研究の整理を行った。それぞれの方法に長所と短所が存在しており有効な適用を考えていくことが今後重要であると考えられる。第3章以降においては、高速道路の交通計画での具体的な問題を解決するためにこれらの方法を用いることにする。もちろんこれらの検討によって、すべての計画問題を解決することは不可能であるが、現実的な問題の記述と解決に対してのこれらの方法の実用的適用を試みるものである。

[第2章 参考文献]

(国内のファジィ理論刊行図書)

- 1) 浅居喜代治・C.V.ネゴイタ：ファジィシステム理論入門，オーム社（改題），1978.
- 2) 西田俊夫・竹田英二：ファジィ集合とその応用，森北出版，1978.
- 3) 寺野寿郎・浅居喜代治・菅野道夫共編：ファジィシステム入門，オーム社，1987.
- 4) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用，サイエンス社，1988.
- 5) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.

(国内のファジィ理論関連図書)

- 6) 坂和正敏：線形システムの最適化，森北出版，1984.
- 7) 寺野寿郎：システム工学入門，共立出版，1985.
- 8) 廣田薫：あいまい制御知能ロボット，マグロウヒルブック株式会社，1985.
- 9) 坂和正敏：非線形システムの最適化，森北出版，1986.
- 10) M・ツェマンコバ＝リーチ，A・カンデル（向殿政男訳）：ファジィ・リレーショナル・データベース，啓学出版，1987.

(国内の特集雑誌)

- 11) 特集・ファジィ理論，数理科学，No.191，1979.
- 12) あいまいさとファジィ理論総合特集号－I，II，システムと制御，Vol.28，No.7，No.10，1984.
- 13) 特集・ファジィ理論と応用，数理科学，No.284，1979.
- 14) 特集・ファジィコンピュータ，Computer Today，No.25，サイエンス社，1988，
(土木計画における研究事例)
- 15) 木下栄蔵・佐佐木綱・秋山孝正：交通機関選択におけるファジィ性の取扱いについて，土木計画学研究・講演集，No.9，pp.337-344，1986.
- 16) 黒田勝彦・長尾義三：不確実性とファジー性下の意思決定の定式化，土木計画学研究講演集，No.2，pp.204-209，1980.
- 17) 黒田勝彦・曾根浩：不確実性とファジー性を考慮した代替案選択法，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.101-102，1986.
- 18) 石田東生：Fuzzy 代数を用いた総合評価に関する基礎的考察，土木計画学研究講演集，No.2，pp.210-216，1980.

- 19) 石田東生・平野邦彦：住民評価の多様性を表現する総合評価モデル，昭和55年度第15回日本都市計画学会学術研究発表会論文集，pp.193-198，1980.
- 20) 金安公造：あいまい理論による重みづけ手法の環境評価への有効性の検討，第40回土木学会学術講演概要集，pp.271-272，1985.
- 21) 永野孝一・金安公造：ファジィ理論による重みづけ手法について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.419-420，1986.
- 22) 永野孝一・野口俊太郎・金安公造：ファジィ多属性効用関数法による水道システムに関する評価構造の同定，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，pp. 404 - 405，1987.
- 23) 永野孝一・金安公造：ファジィ多属性効用理論の定式化と水道システム評価への適用，土木計画学研究・論文集，No.5，pp.131-138，1987.
- 24) 中川修：土地区画整理事業における換地システムに関する研究，土木学会論文集，第371号／IV-5，pp.69-77，1986.
- 25) 内田敬・黒田勝彦：確率ファジィ交通情報下でのルート選択問題の定式化，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.25-26，1986.
- 26) 井上矩之・秋山孝正・飯田克弘：旅行時間情報提供に関する2，3の検討，昭和63年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集IV，1988.
- 27) 吉永優・樗木武：ファジィ線形計画法を用いた2経路選択交通問題，昭和55年度土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，pp.316-317，1980.
- 28) 秋山孝正：ファジィ線形計画の交通制御への適用について，第30回システムと制御研究発表講演会論文集，pp.273-274，1986.
- 29) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村透・広川誠一：ファジィ流入制御モデルの作成と検討，土木計画学研究・論文集，No.4，pp.93-100，1986.
- 30) 外国文献紹介：C.P.パピス，E.H.マンダニ，交差点のファジィ論理制御（秋山孝正翻訳，佐佐木綱校閲）高速道路と自動車，Vol.30，No.7，pp.64-70，1987.
- 31) 加賀屋誠一・山村悦夫・上山和夫：道路粉塵問題の意識構造評価と地域診断方法について，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，pp.250-251，1987.
- 32) 秋山孝正・佐佐木綱：ファジィ推論と交通行動の記述，交通工学，Vol.23，No.3，pp.21-28，1988.

- 33) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村透：都市高速道路交通管制の効率化に関する検討，土木計画学研究・講演集，No.8，pp.129-136，1986.
- 34) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama：Fuzzy On-ramp Control Model on Urban Expressway and Its Extension，Proc. of the Tenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory，pp.377-396，1987.
- 35) 前田正人・桜井英裕・森地茂：土木計画におけるヒューリスティック・アプローチについて，第39回土木学会学術講演概要集，pp.399-400，1984.
- 36) 本多均・渡辺隆・森地茂：あいまいさを考慮した経路選択モデルについて，昭和53年度土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，pp.91-92，1978.
- 37) 佐佐木綱・秋山孝正・植林俊光：Fuzzy 積分の選択行動への適用に関する考察，昭和58年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，IV-10-1～IV-10-2，1983.
- 38) 本多均・渡辺隆・森地茂：Fuzzy 代数による土木施設評価手法，土木計画学研究講演集，No.1，pp.217-221，1979.
- 39) 石田東生・森地茂・土屋謙：バス導入に対する住民の評価に関する研究，昭和54年度土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，pp.156-157，1979.
- 40) 飯田恭敬・児玉健・高山純一：最適代替案確率の図形表示による総合評価手法特性の比較分析，土木計画学研究・講演集，No.8，pp.437-444，1986.
- 41) 後藤喜也・石田東生：ファジィ代数を用いた道路分類手法，第39回土木学会学術講演概要集，pp.249-250，1984.
- 42) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama：An Analysis of Regional Difference in Inhabitants' Consciousness to The Road Construction by Fuzzy Clustering，Proc. of JSCE No.377/IV-6，pp.107-115，1987.
- 43) 湯沢昭・高橋邦夫・須田熙：FSMによる社会システムの構造化に関する研究，昭和55年度土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，pp.139-140，1980.
- 44) 加賀屋誠一：地域環境評価における意識動向構造化手法の適用について，昭和58年度土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，pp.241-242，1983.
- 45) 中西良知・佐藤馨一・五十嵐日出夫：リニアモーターカーの導入を考慮した計画課題の構造化に関する研究，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.111-112，1986.

- 46) 加賀屋誠一・山村悦夫：ファジィ構造モデルによるダム計画の生活環境意識への影響分析，土木計画学研究・講演集，No.8，pp.215-220，1986.
- 47) 橋本武・吉武哲信：広域圏域の設定に関する基礎的研究，土木計画研究・講演集，pp.369-376，1986.
- 48) 飯田恭敬・秋山孝正・四之宮和幸：ファジィ構造分析手法の交通圏分析への適用，第3回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.95-100，1987.
- 49) 上野晴樹：知識工学入門，オーム社，1985.
- 50) 大須賀節雄編：知識ベース入門，オーム社，1986.
- 51) 佐佐木綱・秋山孝正：プロダクションシステムによる交通制御，土木学会第41回年次学術講演会概要集，4，pp.265-266，1987.
- 52) Takamasa Akiyama and Hitoshi Furuta, An Expert System for Traffic Control, Proc. of International Symposium on Fuzzy Systems and Knowledge Engineering, vol.1, pp.198-205, Guangdong Higher Education Publishing House, 1987.
- 53) 秋山孝正，堀田徹哉：交通制御エキスパートシステムについての考察，土木計画学研究・論文集，1987.
- 54) 秋山孝正，堀田徹哉：交通情報処理エキスパートシステムについて、第32回システムと制御研究発表講演会講演集，1988.
- 55) 新設道路の沿道立地予測を目的としたエキスパートシステム構築に関する研究，土木学会第42回年次学術講演会概要集，4，pp.502-503，1988.
- 56) 大橋康弘・二宮功・池田正隆・徳丸精宏：A I を利用した土地利用総合コンサルティングシステム，土木学会第42回年次学術講演会概要集，4，pp.370-371，1988.
- 57) 戸沢泰夫：エキスパートシステムの将来性，第12回電算機利用に関するシンポジウム講演集，pp.249-258，土木学会土木情報システム委員会，1987.

第3章

都市高速道路のファジィ交通制御についての研究

3-1 概 説	47
3-2 交通制御の現状とファジィ交通制御の必要性	49
3-2-1 交通制御における情報収集と処理	49
3-2-2 都市高速道路の交通制御の現状	49
3-2-3 流入制御におけるファジィ性	51
3-2-4 ファジィ制御の必要性	52
3-3 ファジィ流入制御モデル	55
3-3-1 ファジィ制御の方法	55
3-3-2 モデル作成のための準備	58
3-3-3 入力変数の設定	60
3-3-4 ファジィ制御プロセス	62
3-3-5 制御パターンの出力手順	66
3-3-6 パラメータの決定	67
3-3-7 計算結果の検討	68
3-3-8 モデルの各種検討	71
3-4 ファジィ流入制御モデルの実用的改良	78
3-4-1 モデル構造の改良	78
3-4-2 ファジィ交通制御の実用的検討	83
3-4-3 交通制御内容の変更と評価	92
3-5 結 語	104

第3章 都市高速道路のファジィ交通制御についての研究

3-1 概 説

都市高速道路の交通渋滞は交通需要の増大とともに年々激化の一途をたどり、都市の動脈である高速道路を日常的な混雑状態に陥らせている。都市の活動の中心的な交通機能を受け持つ、都市高速道路上の交通に対して、利用者の機能低下は大きな問題となっている。この都市高速道路の快適性と円滑性を保つための交通管制が日常的に行われている。そして実際の交通管制においては、正確な道路交通状態を把握し適切な判断にもとづいて交通管制を行う必要があり、このための情報の収集と処理は最も重要である。近年各種の情報収集機器あるいは光ファイバー等の情報伝達手段は飛躍的に進歩をとげたことから、このような新しい方法を導入することで、都市高速道路における交通管制システムも整備充実されている。

具体的には、①実際の交通渋滞の検知、判断制御といった一連の交通渋滞対策の実際の計算、結果の表示といった交通制御のための判断機構、あるいは、②道路情報板、路側通信システムなどの情報提供のための各種機構が交通管制システムの中心的な機能である¹⁾。ただ現状の交通渋滞を円滑化するための事後的な交通制御においては、上記のような制御計算システムによる機械的な計算結果だけでは十分ではなく、実際には高速道路の状況に対する臨機応変な処理、経験的判断、人間的情報処理と伝達などが非常に重要な要素となっている。

したがって、実際の高速道路上の流入制御（具体的には「ランプの制限、閉鎖」などの実施）についての判断は交通管制担当者に任されている。たとえば阪神高速道路においては、中央の交通管制センターにおいて、交通管制担当者がネットワーク上の交通流の状態から、個々のオンランプの開閉状況をいかに設定するかを総合的に判断している。交通管制担当者は短時間に各種情報を総合化し適切な制御パターンを導くことのできる「エキスパート」とはいえるが、反面常時多くの情報を的確に処理することが課せられるため、その労力は甚大であり、また個人的な判断の差異から制御時間のおくれ、判断の迷いなど

を生じることも考えられる。また、専門的な交通渋滞処理に対する判断能力を持つものが経験の積んだエキスパートに限定されることになり、交通管制の効率化を妨げるものとなっているといえる。

このような現状を踏まえて、交通管制要領の見直し、中央処理用の計算機との入出力の効率化などの収集情報をより効率的に処理し有効な交通管制を実施するための検討が行われている。たしかにこのような計算機の有効利用のための効率化、施設の整備拡充は重要な点であるが、上記のような問題の解決を図るためには、その一つの方向性として人間の判断における有効な点を生かし、かつ計算機に判断可能なシステムを構築することは重要である。

本研究における基本的な考え方は、最終的には「交通制御のための判断システム」ともいべき判断機構を作成することである。さてこうしたシステム開発を考えていく場合、大きな課題である「推論」を定式化することに対してはいくつかのアプローチや応用が検討されている。その具体的なアプローチの一つとしてファジィ推論での記述が提案されている。

制御の分野でも例外ではなく、このような考え方は盛んであり、とくに従来型の制御に対して人間の判断を積極的に導入し、新たな効率よい制御方法をヒューリスティックに求めようとする「ファジィ制御」は実用化の時代に入っている²⁾。さらに交通制御の分野限定すれば、交通信号制御に関する研究がその萌芽であり³⁾、その後、わが国においては列車の自動運転等に適用されている^{4),5)}。現在のところ交通制御の分野での適用例は少ないが、このような発想による研究は、実用化という面から今後特に重要となると考えられる。

まず3-2において交通制御の現状と交通管制の実際について検討する。この際には、今回いくつかの中心的と考えられる交通制御の現状について検討する。また3-3では基本的なモデルの作成をおこなう。また3-4では従来の方法の検討を行い、方法論的なモデル改良の方向性について検討するとともに具体的なファジィ制御モデルの改良を行う。3-5においては、制御行動を改良しこれを新たな制御ルール構成として表現し、この提案される交通制御に対して制御効果を検討する。

3-2 交通制御の現状とファジィ交通制御の必要性

3-2-1 交通制御における情報収集と処理

都市高速道路における交通管制システムとして、阪神高速道路では、管制の効率化のために最新技術を導入してシステムの拡充を図っており、データの収集処理の運用を行っている。情報収集のための主な手段は、①車両検知器、②交通管制用テレビカメラ、③非常電話などである。①は高速道路の出入口や本線上に設置されており、交通量、密度、速度などの測定結果をもとに交通渋滞の有無の判定、渋滞長の測定などを行っている。②は高速道路の主要な地点に設置されており高速道路上の交通状況を視覚により確認しようとするものである。また③は、公団パトロールカー、警察などから非常時に伝達されるものであり、これによって定性的な交通事故などの情報が得られる。また交通管制のために必要な情報として、関係各機関からの情報、気象情報があるが、これも随時収集されている。そして、こうして得られた情報は光ファイバーケーブル方式などによって整備されているデータ通信機構によって各地区管制室の電子計算機に集約され処理される。具体的には、流入制御の計算、渋滞の有無の判定、渋滞長の測定、道路情報板の表示内容の判定などが行われる。また時々刻々変化する高速道路上の交通状況は、管制室のグラフィックパネル上に表示され、あるいは詳細な情報が、ディスプレイ上に表示されることになっている。このように収集された情報は、次のステップである現実に対面している交通状況をより良くするために行われる交通制御のための資料になる。したがって収集した情報を迅速に処理しこれを正確に統合し、さらに適切な交通制御の方法を考えてことは、交通管制の効率化の上で重要である⁶⁾。

3-2-2 都市高速道路の交通制御の現状

都市高速道路における交通制御の方法は、これまでにいくつかの具体的な方法が提案されている。その推移を見ると、まず初期段階においては定常交通状態時に対しては、高速道路の交通量を各当該地区間の容量以下に抑え、かつ高速道路の利用台数を最大にするLP制御を、非定常時に対しては、逐次ランプ制御、あるいは緊急時制御が開発されてきた。さらに一般街路の混雑への影響を考慮して、入路待ち行列を考慮した流入制御方式も開発されてきている。現在では阪神高速道路では交通の現状を踏まえて、こうした交通制御方

法の具体的な検討の結果、基本方針として環状線の円滑な交通を確保することに重点がおかれている。これは一般街路への影響を防止しながら、高速道路全線に渋滞を発生させないようにするLP制御では実用解が得られにくい面があり、一般街路への影響を防止するためには、高速道路上にある程度の渋滞を容認せざるを得ない。これまでの調査研究により制御方法としては、入路信号による入路制御方式が優れているとされているが、全入路を制御対象とするため、設備充実の費用と時間がかかるので、小数の入路を制御対象とするかなり荒い入路閉鎖・ブース制御方式が採用されているといっても過言ではない。この方式の実際の運用手順は、交通管制要領としてまとめられている。これは環状線に渋滞が発生したとき、または放射線下りで渋滞が発生し、渋滞が環状線まで延伸しそうになったとき、放射線および環状線の入路の一部で入路閉鎖とブース制限とを組み合わせる「入路制御パターン表」を規定したものである。（「管制パターン表」と呼ばれる）。このような状況のもとで、阪神高速道路の現行の管制システムでは、5分後の交通状態予測によるLP制御と逐次ランプ制御、および緊急時制御に関し、制御方法の自動提案が、CTRディスプレイ装置により管制担当者に対して表示されるが、前述の事情のよりそのままでは実施されずに管制担当者の判断の参考に供されているに過ぎない。そこで現在は、管制担当者が「管制パターン表」を検索することにより、入路閉鎖とブース制御を行っている。しかしこの場合にも、「管制パターン表」どおり機械的に制御が行われず、管制担当者が時々刻々変化する種々の交通状況から総合的な判断を下して制御しているのが実情である。この判断プロセスは、図3-1に示すようである。⁷⁾ 本図からもわかるように判断には規

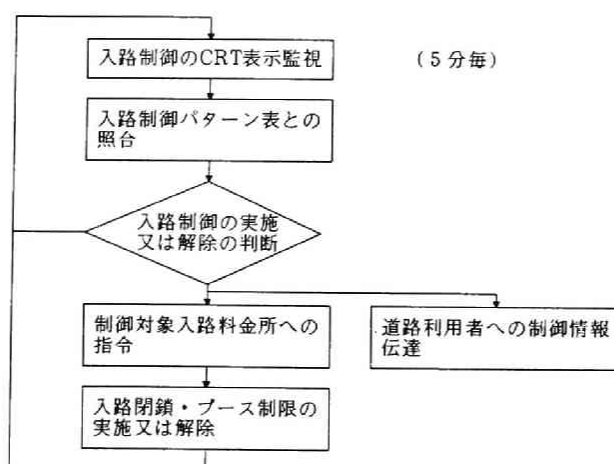


図3-1 パターン制御の運用フロー

則的に行えない部分も含まれている。管制要領以外の管制担当者の判断材料としては、事故、故障車などの偶発的事象、天候、月別、曜日別、時刻別などによる交通量の変動、平面街路の状況、当該ブース閉鎖の継続時間などがあげられる。以上のように現行の流入制御方式ではその制御意志決定時に多分に人間のプロセスが介在していることがわかる。

3-2-3 流入制御におけるファジィ性

前節で述べたように実際の制御意志決定は管制担当者が、種々の交通状況や、過去の経験等に基づいて行っている。このような人間による判断の特長は、入力情報が複雑であったり、また計測の困難なファジィ量であっても総合的に判断を下せる点にある。問題はその判断に要する時間遅れである。そこで本節では、流入制御の実際の運用に内在するファジィ性について代表的な事項をとりあげて検討を行う⁸⁾。

(1) 制御入力変数に存在するファジィ性

都市高速道路において実際の制御を考える場合には計測される多くのデータが用いられている。たとえば渋滞長については、渋滞検知機が500mごとに設置されており、したがって収集される情報も500mを最小単位としている。しかし、実際の渋滞長が3.2kmであったとしても、その区切りのため3.0~3.5kmとして（つまり現実には「3 kmぐらい」という認識として）取り扱われる。これは交通量、オキュパンシー等のデータについても同様のことがいえることである。もちろん実際の各種データを正確に検知できない誤差も存在するが、実際にはこのようなファジィな認識にもとづいて判断がおこなわれていると思われる。

(2) 実際の制御の運用におけるファジィ性

都市高速道路においては、前述のように交通管制パターンが決められており、これに従って運用が行われることになっているが、すべてこのパターン通りに行われるのではなく、平面街路などの状態も考慮したいいくつかの理由から決定されている。したがってこの決定は、熟練した管制担当者の感覚、経験（heuristics）によるところが多いと考えられる。すなわち、基本的にはこのパターンを用いるが、最終的にはファジィな人間の認知する入力から判断をして制御を行うといえる。

（３）制御手順改良プロセスに含まれるファジィ性

制御方法は今後実状に合うように改良していく必要がある。このときに新たな制御方法は、実際の制御を行っていくうえで、経験的にまた人為的に考えていくものでもあり得るであろう。これは制御システム自体が単純でなく複雑な要因から構成されていることによる。したがって管制担当者の経験すなわち「 x が大きいときは y を大きくする。」といったファジィな形で内容を表示でき、さらにルールの追加、修正が容易な定式化を行うことは必要なことであろう。

3-2-4 ファジィ制御の必要性

ここでは、実際の制御の状況を把握するため、都市高速道路の交通管制において用いられている管制パターンと実際の制御について検討する。図 3-2 は、阪神高速道路において定められている交通管制パターンの一例である。図中に示されている通り基本的には、環状線に渋滞が発生した場合の渋滞の延伸状況から実施すべき入路制御のパターンが定められている。特にこの例において界線の入路のみに注目すれば、図 3-3 に示すような制御ルールを読みとることができる。

この制御ルールに従えば、制御結果は渋滞長のみに依存し交通管制パターンに完全に追従した制御結果を出現するはずである。そしてこの結果と実際に現場で行われた制御結果を比較しその差異を検討する。ここでは、平日の代表的な一日をとりあげて検討する。まず表 3-1 は、交通管制パターンによった場合の制御と実際の制御においてそれぞれ出現する入路の開閉状態を示したものである。比較的出现するパターンはよく似ているが、交通管制パターンでは開閉状態が (4,1,2) となるものが実際には生起せず、これに近いものとして (4,1,1) が存在している。これをそれぞれ表 3-1 中に示す記号によって表わす。

次にこのパターンの時間変化を示したものが、表 3-2 である。ただし管制パターンによる場合は、渋滞発生地点が一区間上流の四ツ橋となっているため、ここから渋滞が発生した際をパターン表でいう一区間の延伸と考えている。この表を見ると、実際の制御は、管制パターンよりかなり遅れて開始され、また生起するパターンも状況変化に応じて b と c の間で変化していることがわかる。つまり、（１）機械的な判断よりも遅れを生じる、（２）単に渋滞長のみで判断しているのではない、といった点が特徴として把握される。

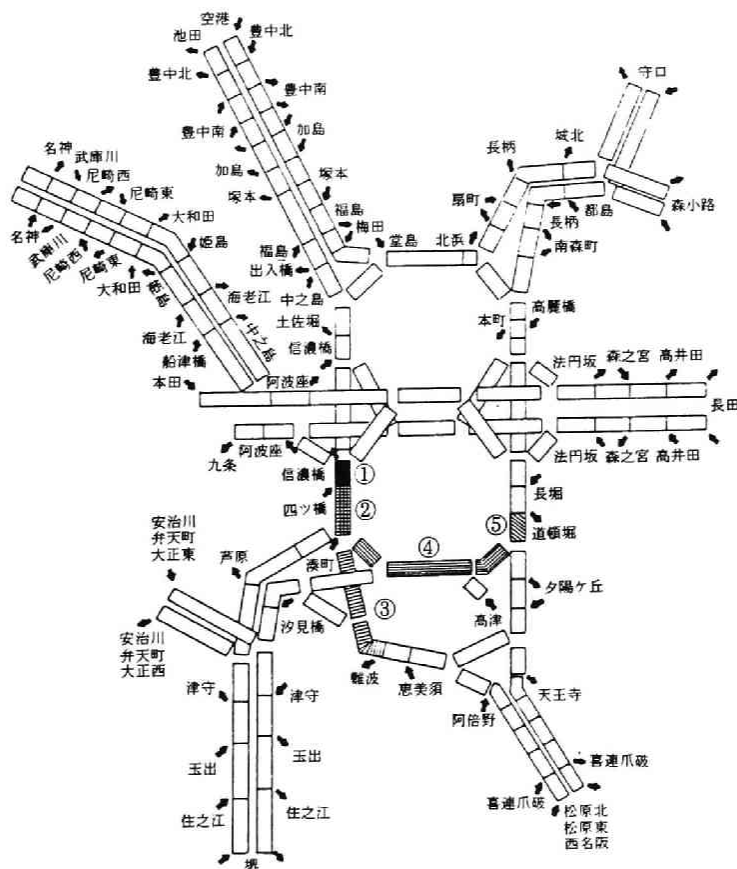
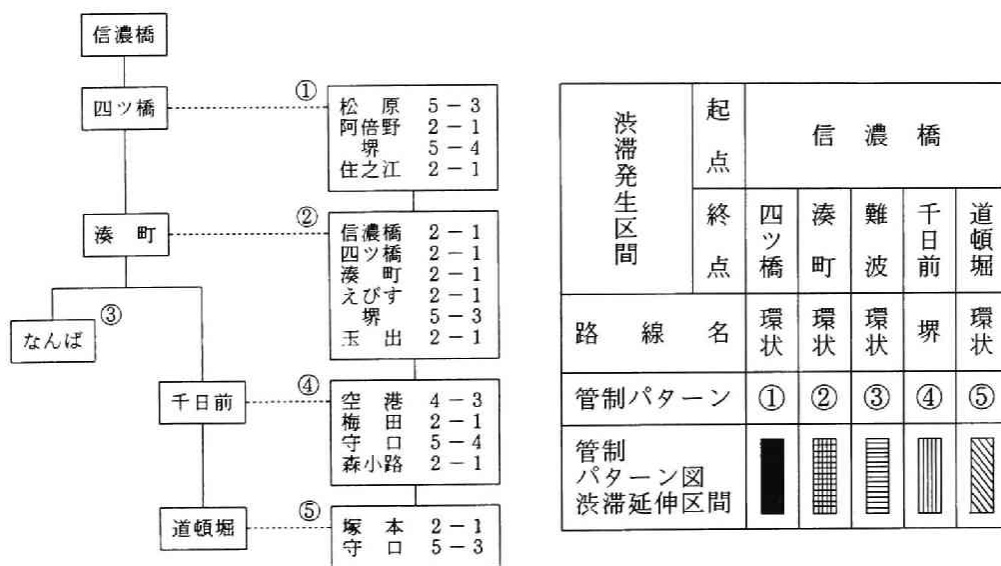


図 3 - 2 制御パターン表の例

表3-2 制御パターンの変化の例

ルール1	非渋滞時には	制御パターン (5, 2, 2)にする
ルール2	渋滞が延伸すれば	制御パターン (4, 1, 2)にする
ルール3	渋滞が一区間以上 延伸すれば	制御パターン (3, 1, 1)にする

(注) ()は(堺、住之江、玉出)の開口ブース数

図3-3 管制パターンの制御ルール

表3-1 管制パターンとブース開口状態

管制パターン による制御	実際の制御	記号
(5, 2, 2)	(5, 2, 2)	a
	(4, 1, 1)	b
(4, 1, 2)		b'
(3, 1, 1)	(3, 1, 1)	c

このように実際の制御は、管制パターンは参考にはするものの複雑な周囲の状況を考慮して臨機応変に行われていることがわかる。このような結果となる最も中心的な理由は実際の制御では交通管制担当者が人間的判断で、制御行動を決定していることである。そこで実際の判断過程をモデル化しようとするれば、人間のファジィな判断を記述したモデルが必要となるのである。

3-3 ファジィ流入制御モデル

3-3-1 ファジィ制御の方法

ファジィ関係と推論についてすでに第2章で述べたのでここでは簡単に述べることにする。ファジィ集合AとBのファジィ関係Rとは、たとえば「AとBは良く似ている。」な

NO.	時刻	管制パターンの制御	実際の制御
1	8:00	a	a
2	8:15	a	a
3	8:30	a	a
4	8:45	b'	a
5	9:00	c	a
6	9:15	b'	a
7	9:30	b'	a
8	9:45	c	a
9	10:00	c	c
10	10:15	c	c
11	10:30	c	c
12	10:45	c	c
13	11:00	c	c
14	11:15	c	b
15	11:30	c	b
16	11:45	c	b
17	12:00	a	a
18	12:15	a	a
19	12:30	a	a
20	12:45	a	a
21	13:00	a	a
22	13:15	a	a
23	13:30	b'	a
24	13:45	b'	a
25	14:00	c	c
26	14:15	c	c
27	14:30	c	c
28	14:45	c	c
29	15:00	c	c
30	15:15	c	c
31	15:30	c	b
32	15:45	c	b
33	16:00	c	b
34	16:15	c	b
35	16:30	c	b
36	16:45	c	c
37	17:00	c	c
38	17:15	c	c
39	17:30	c	c
40	17:45	c	c
41	18:00	c	c
42	18:15	c	c
43	18:30	a	a
44	18:45	a	a

どの両者の関係を表現するファジィ集合である⁹⁾。具体的には、

$$R = \int_{x,y} \mu_R(x,y)/(x,y) \quad (3-1)$$

のように表現されるが、このメンバシップ関数 $\mu_R(x,y)$ は、 A 、 B のメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ 、 $\mu_B(y)$ を用いて二項関係によって決定される。 $\{x: 5 \text{ ぐらい}\}$ ((4)式) に対して、 $\{y: 4 \text{ ぐらい}\}$ を示す $\mu_B(y)$ を

$$\sum \mu_B(y)/y = 0.4/3 + 1.0/4 + 0.4/5 \quad (3-2)$$

のように定義すれば、この $\mu_A(x)$ と $\mu_B(y)$ を用いて、ファジィ関係を示す $\mu_R(x,y)$ は、たとえば

$$\mu_R(x,y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \quad (3-2)$$

のように示すことができ、この $\mu_R(x,y)$ で「 $x: 5 \text{ ぐらい}$ のとき $y: 4 \text{ ぐらい}$ 」という関係が保存される。したがってファジィ集合 B は以下の計算で得られる。このルール R の決定はMamdaniの方法といわれ、最も一般的な推論の方法である。

$$B = A \circ R = \int_y \sup [\mu_A(x) \wedge \mu_R(x,y)]/y \quad (3-3)$$

ここで \circ : max-min 計算, \sup : 上限

この演算は論理的な関係 「If x is A then y is B 」
(もし x が A ならば y を B とする。) を表現するものである¹⁰⁾。「 x is A 」とは異なる入力「 x is A' 」によって得られる推論結果「 y is B' 」はつぎのようにして求めることができる。

$$B' = \int_y \sup [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x,y)]/y \quad (3-4)$$

このようなファジィ推論は、図3-4に示すような形の判断を行っていることがわかる。ファジィ関係を表現するためのメンバシップ関数 $\mu_R(x,y)$ を $A \rightarrow B$ の関係として決定しておけば、「 x is A' 」の状態を示すメンバシップ関数 $\mu_{A'}(x)$ から推論結果として y の状態を示すファジィ集合 B' が求められることを示している。ここで経験等による「知識」は、 $A \rightarrow B$ の関係として保存されるわけである。メンバシップ関数として表現される

ファジィな入力変数(fuzzy variables)により出力側にもひとつの分布を持つファジィな変数が得られるものである。この点については、第2章においてものべたとおりである。

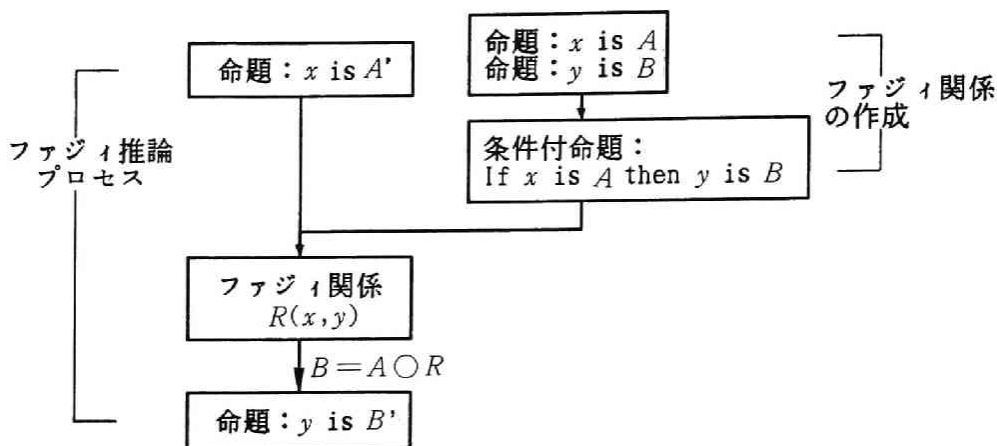


図3-4 ファジィ推論の手順

[ファジィ制御]

ファジィ制御は、さきにのべたようにファジィ推論の制御への適用である。したがって基本的方法論は同様である。ただし対象を「制御」とすることから、一般に入出力はファジィでない数値である。ファジィ集合が従来の集合も包含していることから、ファジィ推論においても入力情報である A' に $[x=5]$ などの普通の数(クリスプ入力)が可能であり、ファジィ制御等への適用ではこの形を用いている。すなわち、制御の判断は「 x が大ならば y は大」といったファジィ推論の形で表現され、入出力値は確定値を用いることができるということである。

$$\begin{cases} \mu_A(x_i) = 1, & i = s \\ \mu_A(x_i) = 0, & i \neq s \end{cases} \quad (3-5)$$

$$x_i \in X = \{x_1, x_2, \dots, x_s, \dots, x_n\}$$

これは、 $x=x_s$ という入力のときのみメンバシップ関数値が1になることを示すものである。したがって入力 A' に対して出力 B の分布は、

$$\mu_{B'}(x_j) = \max [\min \{ \mu_{A'}(x_s), \mu_R(x_i, y_j) \}]$$

$$\begin{aligned}
 &= \max [\min \{ \mu_A(x_s), \mu_A(x_i) \wedge \mu_B(y_j) \}] \\
 &= \mu_A(x_s) \wedge \mu_B(y_j)
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

のように求められる。

ここで、 $\mu_A(x_s)$ は確定値であるので、ひとつの分布をもったメンバシップ関数 $\mu_B(y_j)$ を一定の値以下として考えたものに相当する。

つぎに実際の交通管制状況をファジィ制御モデルとして実現する際の全体構成について述べる。すでに見たようにファジィ推論においては、入力、出力ともに「ファジィ量」であって、数学的には、それぞれがメンバシップ関数としての分布を持つ。したがって交通管制モデル作成上問題となるのは、①実際の判断材料となる計測変数、あるいは経験的変数をファジィ推論への入力値として表現すること、②推論出力結果のファジィ的な数量値を実際の交通制御行動に対応させる点である。特にこの2点に着目してモデルの全体構造を考えたものが図3-5である。具体的には、

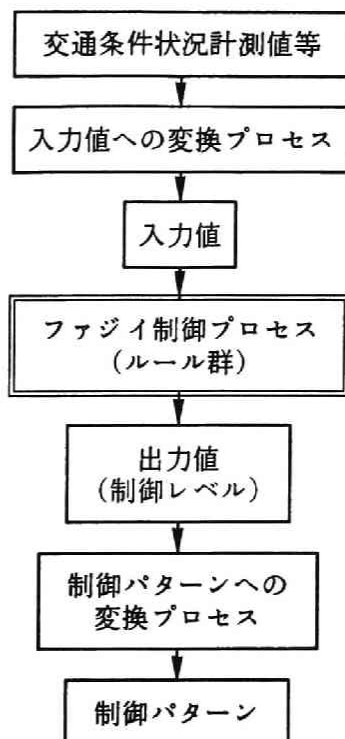


図3-5 ファジィ流入制御モデルの構造

入力情報として渋滞状況、交通状況を表す変数をそれぞれ妥当な形の入力変数に置き換え、いくつかのルールの集合を用いた「ファジィ推論」の演算を行う。さらに交通管制の必要性、あるいは制御の程度を表す値が一定の数値として出力されるが、これを実際の交通管制に対応したブースの制限、入路の閉鎖といった形に変換するというプロセスをとる。このような手順で実際の管制担当者の判断を近似的に表現することができると考えているわけである。具体的な個々の内容については、以下で検討する。

3-3-2 モデル作成のための準備

(1) 対象路線

本研究のモデルでは、都市高速道路の制御の一例として、阪神高速道路の環状線において渋滞が発生した場合に、界線上りの入路において行われる制御を対象としている。したがってモデルでは図3-6に示すように路線の実際の運用に合わせて①～③の渋滞発生場

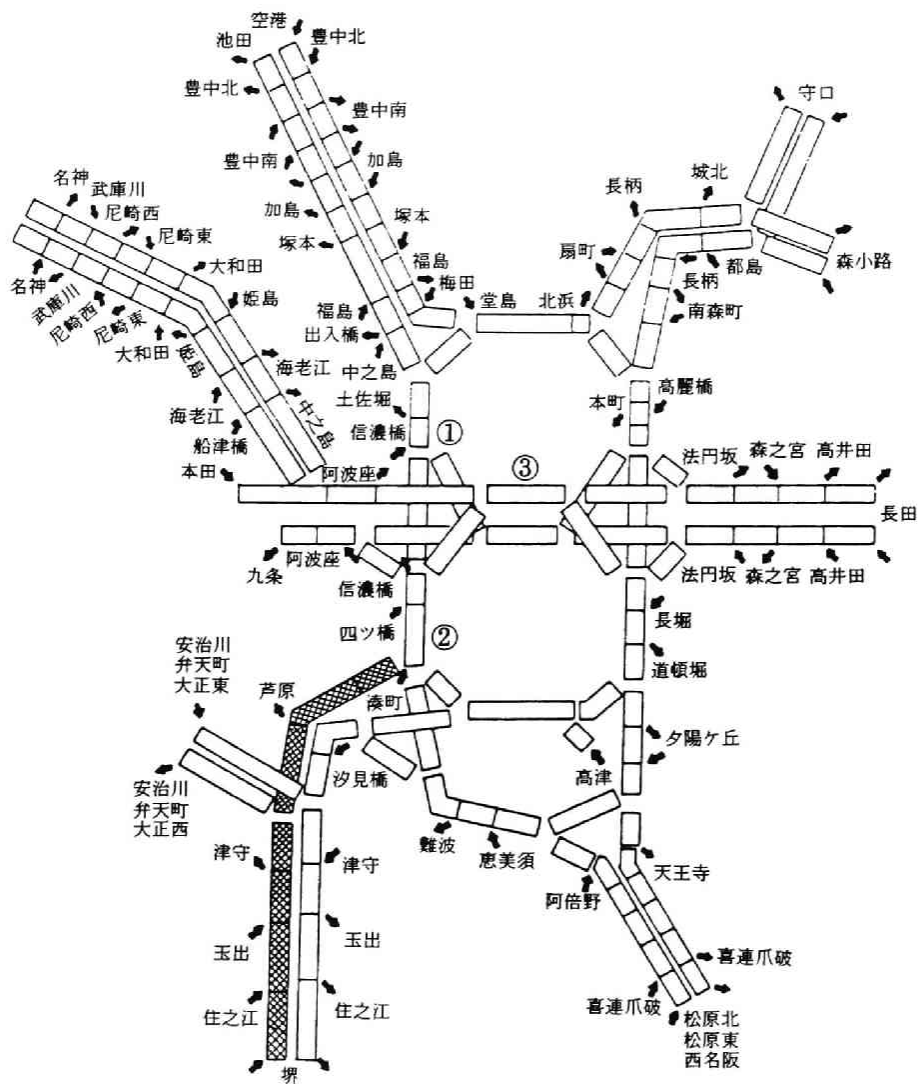


図3-6 モデルの対象路線

所を考えるものとする。本来、交通管制において、各入路の開口の有無は、高速道路全ネットワークを対象に行われるものであり、一路線のみを取り上げることは適当ではないが、前項で用いた管制パターン表にもあるように、特定路線の方向に渋滞が延伸した場合には当該路線において制御を行うことが多い。（ここでは、堺線方面に渋滞が延伸する場合に堺線上りで制御を行うことが多い）。したがって、環状線上の渋滞発生地点を限定して考えれば、それに対応した特定路線のみの制御を検討することも可能であると考えている。

（２）交通制御パターン

本研究では都市高速道路の交通制御状況を検討するために、阪神高速道路大阪堺線上りを対象として考察を行った。本来、交通制御は阪神高速道路全体のネットワークの効率的利用という視点から検討し、またその具体的な方法を述べるべきであるが、放射線の上りはその構造が比較的単純であり典型的な交通制御状況が生起していると考えられ、ここではこれについて検討するものである。

堺線上りは前述の３入路が存在し、実際に行われる制御はこれらの入路のブース開口数の組み合わせ（「制御パターン」と呼ばれる）によってあらわすことができる。この表からわかるように、堺の開口ブース数がこの路線の制御では中心的なものとなっており全ブース開口時の５ブースから制御時の３ブースまで変化がある。また他入路の住之江、玉出においては２ブースを１ブースにすることで実際の流入制御を行っている。これは利用者が完全に流入不可能となる完全閉鎖の状態をできる限りさけようとすることから、このように設定されているものと考えられる。

渋滞状況と同じく、15分間の時間断面ごとのその時点でおこなわれていた制御パターンを集計し、これをもとに各時間断面で最も生起している回数の多い制御パターンを連続的に描いたものが図３－７である。またこれを制御時間全体を通じての時間断面でみた各パターンの発生比率を計算したものが表３－３である。いずれもパターンの時間的な発生状態を知るためのものである。

これらの図表からつぎのことがわかる。まず堺線の上りにおいては、４個の制御パターンのうち最も閉鎖程度の大きい「パターン４」が最も多く採用されている。これは、午前10時から正午までと、午後２時から午後７時までの交通集中時における交通制御であるといえる。また正午からの昼間の時間帯は一時的に閉鎖を解除することが多い。当然のこと

ながら早朝と深夜には、ほとんどのブースの制限はおこなわれていない。このように一日に2度「パターン4」の流入制御をおこなうのが堺線上りの典型的な制御といえる。

また全ブース開口の「パターン1」と交通集中時の「制御パターン4」の間での過渡的な交通状態に対する制御として、午前9時から午前10時までの制御開始時間帯には「パターン2」が「パターン4」への移行の途中で行われる。また「制御パターン4」が多く現れる時間帯と環状線合流部を先頭とした渋滞の発生する時間帯はほぼ一致しており、環状線合流部からの渋滞の延伸状況が堺線上りの制御を検討する場合にはとくに大きな判断要因となっていることがわかる。また中間的な2つ「パターン2」と「パターン3」について

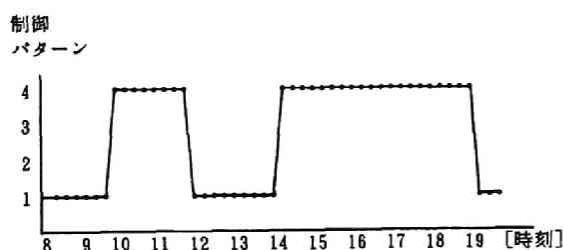


図3-7 時間断面ごとの制御パターン

表3-3 交通制御パターンの集計

制御パターン	時間断面数(%)
1	10201(70.8)
2	766(5.3)
3	361(2.5)
4	2945(20.5)
その他	127(0.9)
合計	14400(100.0)

述べると、全体の時間帯からいえば発生頻度は少ないが、渋滞の延伸衰退の変化時には多く用いられているパターンであり、とくに前者は渋滞の延伸時に、後者は渋滞の衰退時によく用いられていることがわかっている。

この集計では制御を行わない夜間の時間帯も含まれているため(5,2,2)の全ブース開口の時間数が当然大きくなっているが、この表から実際の自然渋滞に対する堺線の入路制御のパターンは4種類で99%を占め、これに限定してよいことがわかる。また、本研究においては、管制担当者の制御パターンについての認識を現場において取材したが、堺線においてはやはりこの4パターンを通常考えて制御を行っていることが確かめられた。

3-3-3 入力変数の設定

モデルへの入力変数としては、実際の管制担当者が制御パターン決定における判断材料としているものを用いる必要がある。判断には数多くの要因が関係しているが、これらすべてを取り込むことはモデルを複雑にし、操作性も悪くなる。そこでモデルの説明力が失

われない程度に要因を限定することが有効な方法である。ここでは、重要と考えられる2要因を取り上げた。以下にこれについての説明を行う。

（１）渋滞長

渋滞の程度を知る基本量であり、ここでは環状線四ツ橋を先頭とした自然渋滞が、堺線方向に延伸した場合を考えることにする。実際の交通管制状況を見ても渋滞長は、5分間ごとに計測され、またパネル・ディスプレイに表示されており、判断の最も中心的な資料となっている。これは、交通制御におけるファジィ性を考えた際にも示したことである。本研究においては、実際に発生した自然渋滞の5分間記録データを15分毎に平均して（すなわち3時点の算術平均）データを作成した。

（２）交通需要量

交通管制担当者は、順次計測される諸指標による判断に加えて、経験的な判断も行っていると考えられる。特に担当者が予見的に今後発生するであろう交通需要に対しての判断を行っている場合は、十分に考えられることである。たとえば、ある程度渋滞が延伸していても平素の経験から需要が減少傾向にあり、その結果ブースの制限を強化する必要はないと判断するといった場合である。実際のデータ作成にあたっては、このような交通需要の変動は1日のパターンとして認識していると考えた。実際には、昭和55年京阪神都市圏パーソントリップ調査結果より、車利用トリップの大阪市集中量の時間帯別分布（1時間）に基づき、これを15分単位に分割して計算に用いるデータとした。この変化を図3-8に示す。なお、この集中交通量は、大阪市内到着時刻を基準としたものであり、高速道路の流入制御の判断時点とは、時間的なずれを生じるので、判断単位で1時点（15分）だけ早めたものを入力データとして用いる。

（３）対象日時の設定

以下でモデルを作成していくために、対象とする日を決定する。ここで作成するモデルは検討の基本となるものであり、平均的な交通状況の変化をした日のデータを用いる必要がある。特に堺線においては、午前中および午後それぞれ四ツ橋付近を先頭にした渋滞がそれぞれ一度ずつ発生するというのが平日の最も一般的な傾向である。そこで、本研究では昭和60年1月の平日のデータより妥当と考えられる1月8日の交通渋滞および交通

管制記録を用いることとした。このとき（１）、（２）で示した手順によりモデル作成のためのデータとした。また、以上のように決定されたデータ（渋滞長、経験的交通需要量、制御パターン）を具体的な数値として表３－４に示す。

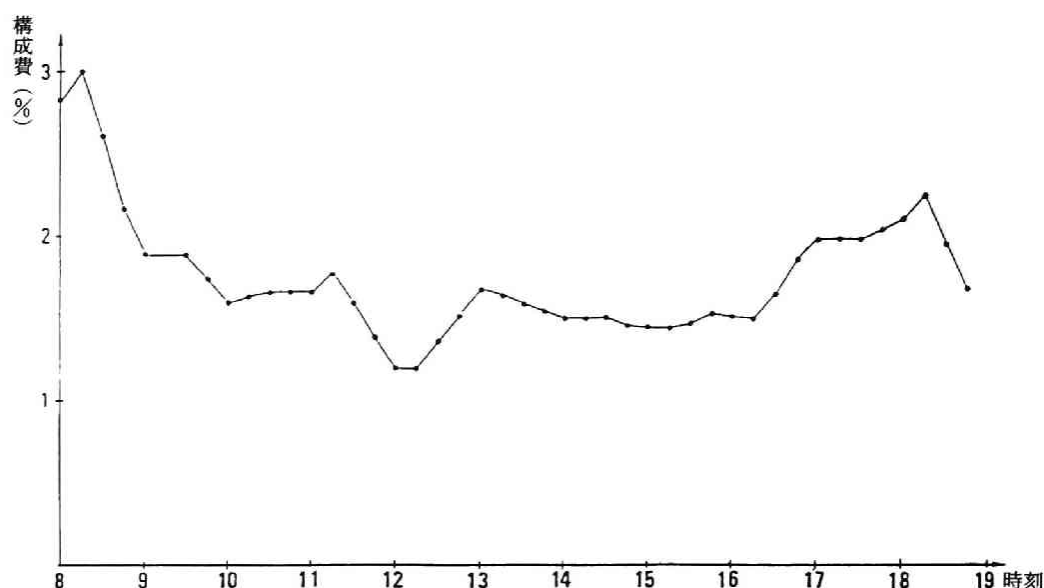


図3－8 大阪市自動車集中交通量の時間変化

3-3-4 ファジィ制御プロセス

本項では、具体的なファジィ推論過程を含むファジィ制御プロセスの作成について述べる。モデルの基本的構造でも示したように本モデルではファジィ性を表現するための構造上問題となる部分が数箇所あり、ここではこの点のついて以下に検討することにする。^{8), 12), 13)}

（１）ルールの構成

まずルール構成について述べる。ルール構成は、ファジィ推論モデルの挙動そのものを規定することになり、また明示的に判断内容を示すことができるので有効である。ここでは基本モデルとして比較的単純なルールで判断されるように次のような構成をとした。

①渋滞長に対しては、「長い」「中程度」「短い」という3つの区別を行い、これがそれぞれ制御レベルの「大」「中」「小」の認識に対応するであろうと考えた。②経験的な「交通需要量」

の影響に対しては、渋滞長が長い場合や、逆に短い場合には、交通状況に対する判断が明かであるとして、渋滞長が中程度の際に入力値として判断材料となると考えた。①については、必ずしも大、中、小の3レベルで良いという理由はないが、人間の認識の分類としてあまり多数のカテゴリーが存在することは不適当であり、またモデルの構造として複雑となることからこのように設定した。②については、①の渋滞長とは全く同等には考慮されておらず、今後の渋滞の変化に方向を知る必要がある場合に用いられることから上記のように考えた。

これらはいずれも、最終的には実際の現場における取材によって妥当性を確認した。以上のような検討に基づいて、実際のモデル内で用いられるルール構成を示したものが図3-9である。このモデルにおいては、条件付命題の形でルールが表示できることがひとつの特長となっており、これによってモデル内の制御内容が明示的に表現される。さらに本来この条件付命題は、「IF…THEN」の形式の一群の論理式として記述することになっている。このルール群では、ルール1～ルール5のそれぞれのルール間はOR（または）で結ばれている。これらは知識工学の分野のプロダクションシステムにおける表現と類似している。

表3-4 基本モデル作成のためのデータ

NO.	時刻	渋滞長 (km)	経験的流入 需要量	制御 パターン
1	8:00	0.00	17829	1
2	8:15	0.00	19152	1
3	8:30	0.00	16443	1
4	8:45	0.33	13671	1
5	9:00	1.17	11844	1
6	9:15	0.17	11844	1
7	9:30	0.33	11844	1
8	9:45	1.33	10899	1
9	10:00	3.17	9954	4
10	10:15	5.00	10332	4
11	10:30	5.33	10458	4
12	10:45	4.17	10521	4
13	11:00	4.50	10584	4
14	11:15	4.50	11214	2
15	11:30	4.67	9954	2
16	11:45	1.50	8694	2
17	12:00	0.83	7434	1
18	12:15	0.00	7497	1
19	12:30	0.00	8568	1
20	12:45	0.00	9576	1
21	13:00	0.00	10584	1
22	13:15	0.00	10269	1
23	13:30	0.00	9954	1
24	13:45	0.33	9939	1
25	14:00	2.33	9387	4
26	14:15	5.33	9387	4
27	14:30	5.67	9387	4
28	14:45	5.67	9198	4
29	15:00	5.67	9072	4
30	15:15	5.50	9009	4
31	15:30	2.50	9261	2
32	15:45	3.00	9513	2
33	16:00	4.30	9324	2
34	16:15	2.83	9324	2
35	16:30	5.00	10269	2
36	16:45	6.17	11529	4
37	17:00	5.33	12348	4
38	17:15	7.17	12348	4
39	17:30	7.50	12348	4
40	17:45	7.00	12726	4
41	18:00	7.00	13104	4
42	18:15	2.33	13797	4
43	18:30	0.00	12033	1
44	18:45	0.00	10332	1

(台/15分)

R-1: IF	CON = short	THEN	LEVEL = low
R-2: IF	CON = medium	AND DEM = small	THEN LEVEL = low
R-3: IF	CON = medium	AND DEM = medium	THEN LEVEL = medium
R-4: IF	CON = medium	AND DEM = big	THEN LEVEL = high
R-5: IF	CON = long	THEN	LEVEL = high

図3-9 基本モデルのルール構成

(2) メンバシップ関数

さきに決定したルールにしたがって演算を行うためには、「大きい」「小さい」といった概念をメンバシップ関数として示さねばならない。メンバシップ関数の設定は、こうしたあいまい変数 (Fuzzy Variable) の定義に等しく、台集合 (support) の与え方に大別して離散集合と連続集合による方法が存在する。これまでの研究により、両者の長所・短所が検討されて、これを簡単にまとめたものが表 3-5 である。いずれの方法によってもモデル化が可能であるが、本研究においては、操作性を重視して連続集合を用いることにした。これは実際の入力変数が、渋滞長、あるいは需要量といった連続的变化をするものであることから妥当であるといえる。

表 3-5 メンバシップ関数の形状の比較

種 類	長 所	短 所
離散集合	<ul style="list-style-type: none"> ・段階的で値の設定が容易 ・試行錯誤的な設定が可能 ・計算処理速度は速い 	<ul style="list-style-type: none"> ・連続的な変化をせず、入出力値が限定される ・メモリを多く用いる
連続集合	<ul style="list-style-type: none"> ・関数をパラメータ表現可能 ・メモリは小さい ・種類の関数形を設定できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・妥当な関数設定が難しい ・計算処理速度は速い

次に実際の関数形であるが、これについても種々の形が考えられるが、一般にもちいられている次の形の関数を用いた。この関数は、 x が $\{0, 1\}$ において定義されるもので中央値 m の周辺に鐘状に分布する形状であり、図 3-10 に描かれているように中央値 m と分布のひろがりの大きさを示す 2 つのパラメータで、形状の差異を表現できる。

モデルにおいてメンバシップ関数の設定が必要となるのは、入力変数として渋滞長、経験的交通需要量、および出力変数であり、いずれも同様に「大」「中」「小」の 3 段階を考えており、すべてこの図 3-10 に示す関数形を用いている。

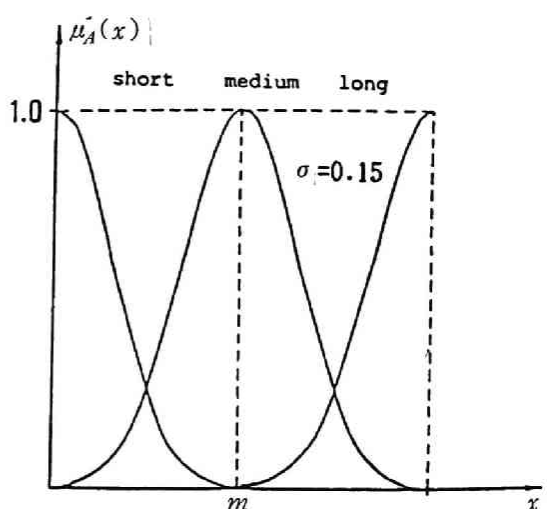


図 3-10 メンバシップ関数

(3) ファジィ合成方法

ファジィ推論演算を設定する際に必要となるのはファジィ関係作成のための合成法である。これに関しては、①minオペレーション（交通信号の制御、プラントの制御などに用いられた考え方）、②積オペレーション（セメントキルンへの適用が著名）がある。これらは、いずれもmax-minルールによる演算が可能である点は同一であるが、いずれも長所、短所が考えらる。

この両方法によってモデルの挙動を比較検討していくことが必要であるが、これについては後述し、ここでは適用例も多く、構造的に単純で、演算も比較的容易なminオペレーションを採用することにした。

(4) 出力値への解釈変換方法

次に出力変数の変換法（解釈変換法）について検討する。これについても従来からいくつかの方法が示されているが、主要な考え方は、①分布形状でグレードの高い部分を用いる、②分布形状の重心をとるである。これらはいずれも図3-9に示した各ルール（本モデルでは5ルール）の判断の際のルール相互間のウェイトの決定方法を考えることに相当するものである。

①の方法によれば5つのルールのうちいくつかの出力分布が得られるが、このうち最も高いもののみを用いるということである。結局5ルールのうちいずれか1つのルールのみが実際の判断に用いられることは同様であるが、それぞれの分布の最高値をウェイトと考え、②の場合では5つのルールの組合せによって確定値を求めようとする方法である。つまり全ルールの加重平均的な値をとるものである。これまでの各分野における適用例においても、いろいろな方法がみられるがルールの組合せとなる②の方法が多くみられ本研究でもこれを用いる。②の方法による分布形から出力変数への解釈変換方法を説明したものが図3-11である。この場合もちろんメンバーシップ関数が $[0, 1]$ で定義されていることから、その出力値も $[0, 1]$ である。したがって実際の制御に用いるレベル値とする

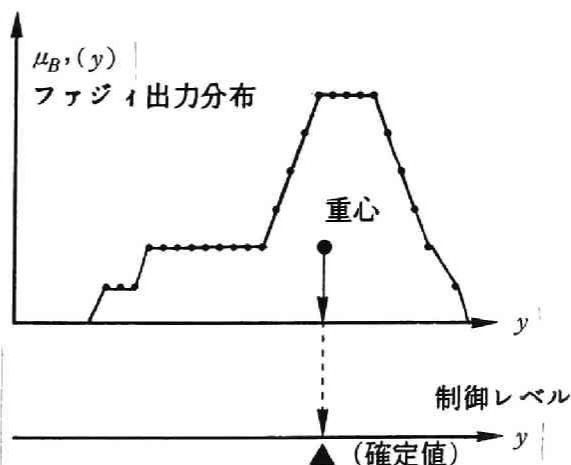


図3-11 確定値への変換方法

ためにはこれを再度変換してやる必要がある。

3-3-5 制御パターンの出力手順

前述のように出力変数（0-1の値）と実際の交通制御パターンとの関係性を求めておく必要がある。これは実際には管制担当者がどの程度の制御の必要性から各ブースの閉鎖を行っているかを求めることに相当する。本研究では実際に阪神高速道路の交通管制担当者取材し、表3-6に示すような認識を行っていることがわかった。本表よりこの路線では、他の入路のブースを閉鎖するより、堺入路のブースの閉鎖の方が効果が1.5倍程度大きいと判断していることがわかる。この認識は人間の判断によるもので、これが単純に線型に増加するか否かは詳細な検討を要するが、ここでは単純化のためにこれを用いることにする。

そこでそれぞれのパターンによって閉鎖されているブース数に表3-6の判断の目安となる量を掛け合わせることで、表3-7に示すようなパターンごとに制限されると考えている量を求めた。この結果制御期待量は、0（全ブース開口）から、200（パターン4）までの間に分布することがわかる。

またこれをレベルとパターンの対応のために、各パターンの境界は、各領域の中央値をもってその判断が分かれているとすれば、図3-12に示すような分類を行うことができる。また実際のモデル内の数値としては、出力関数の分布形状を規定しており、最終的には0.13~0.88の間で出力されるのでこの尺度に換算して出力値の範囲を示している。

表3-6 制御基準量の例

入 路	1 ブース閉鎖による期待制御交通量
堺	55~60
住之江	35~40
玉 出	35~40

(台/5分)

表3-7 制御パターンと期待制御量

パ タ ー ン	開口ブース数			期待制御量
	堺	住之江	玉 出	
1	5	2	2	0
2	5	1	1	70~80
3	4	1	1	125~140
4	3	1	1	180~200

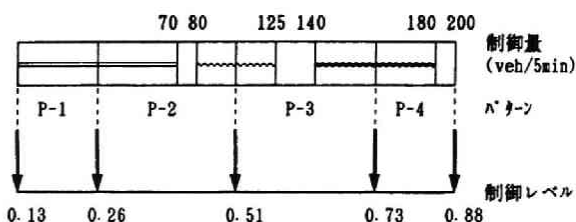


図3-12 制御レベルと制御パターン

3-3-6 パラメータの決定

つぎにモデルの同定のためのパラメータの決定を行う。本モデルでパラメータとして考えたものは表3-8に示すとおりである。またこれを図中に示したものが図3-13である。これらの値を決定することは、結局メンバーシップ関数の形状を決定することに相等する。た

表3-8 モデルのパラメータ

種類 定義	渋滞長	経験的需要量
認識基準値	m_1 (下限値)	m_2 (中央値)
認識の範囲	m_1 (上限値)	m_2 (上限値)
分布形状	σ_1	σ_2

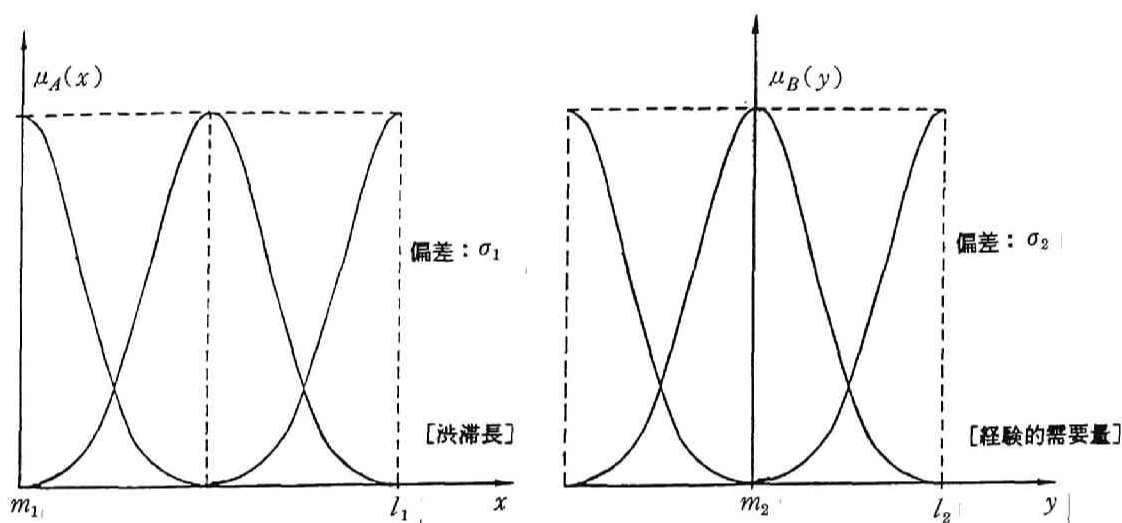


図3-13 基本モデルのパラメータ

だし、ファジィ制御では現在のところ数値解析的なパラメータ探索の方法を用いることは少ない。一般に制御担当者の知識あるいは学習によってヒューリスティックに決定されるものとなっている。本研究では図3-14に示すような段階的な総あたりの方法を取り、実際の判断の整合性から決定することにした。

表3-9 パラメータ推定結果

種類	渋滞長	経験的需要量
認識基準値	0	9450
認識の範囲	5.8	10710
分布形状 σ	0.15	0.15

この方法では解の適合性を見るための判断基準が、この適合性指標のみであるため、最適な値をとるパラメータの組合わせはいくつも求めることができる。ここでは、たとえば σ の値ができるかぎり大きくなるようにパラメータを求めた。この結果を表3-9に示す。

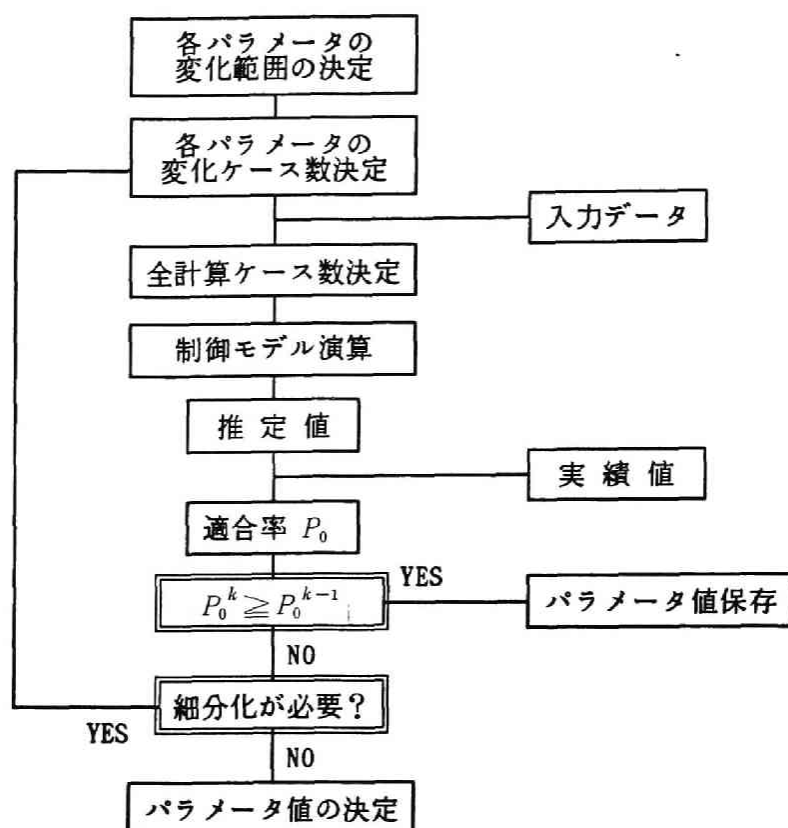


図3-14 パラメータ推定手順

3-3-7 計算結果の検討

さきに求められた各種のパラメータによってモデルが決定される。つぎに計算の実行のために本モデルの構造を具体的に検討する。モデルの構造(図3-5)に見るように最初の入力変数としては渋滞長と経験的に判断している流入需要量を用い、これが5つルールで構成される一群のファジィ推論の過程を経て、判断結果である各入口の開閉状態が得られるわけである。これは制御判断の時刻ごと(本例では15分)に入力出力は繰り返されることになる。

ここで用いたデータは先述のように平日（昭和60年1月8日（火））の8:00～18:45のものであり、これを15分断面ごとに示せば44断面について考えていることになる。

このモデルの実際の現象に対する説明程度を見るために、モデルでの出力値と実際の制御結果との比較をしたものが表3-10である。本表は、実績値、モデルによる推定制御パターン、および出力制御レベル値がそれぞれ示されている。また図3-15は実績、モデル

によるパターンを時間変化として、図中に描いたものである。すなわち、もし実際に行われた制御結果とモデルにおける判断結果が一致した場合には、表3-10においては、両者のパターンを示す数値（1～4）が一致し、また図3-15においては、それぞれの時刻で○と●の一致している箇所がこれに相等する。これらの図表より、作成したモデルの挙動として以下のことが言える。

- ①全断面を見て、全体的に現状の判断とよく一致しており（44断面中36断面が一致）モデルによる説明程度は高いと考えられる。
- ②本モデルは制御レベルから制御パターンに変換するプロセスを持つため、制御レベルの微小な変化でもある境界値をこえるとパターンが変化するので、同一パターンの継続中に一時的に他のパターンが入るといった現実的でない状態を示しているものがある（たとえば、9:00と15:45のパターンでは、その前後の継続パターンに比べてレベルの1つ高いパターンとなっている）。
- ③渋滞の延伸、解消に伴って制御行動を大きく変化させる際には、いずれも若干の制御の時間的ずれを生じている。これは、実際

表3-10 モデルと実績の制御パターン

NO.	時 刻	制御パターン		出力レベル
		実 績	モデル	
1	8:00	1	1	0.129
2	8:15	1	1	0.129
3	8:30	1	1	0.129
4	8:45	1	1	0.145
5	9:00	1	2	0.359
6	9:15	1	1	0.135
7	9:30	1	1	0.145
8	9:45	1	2	0.441
9	10:00	4	3	0.533
10	10:15	4	4	0.793
11	10:30	4	4	0.850
12	10:45	4	4	0.802
13	11:00	4	4	0.815
14	11:15	2	4	0.845
15	11:30	2	3	0.694
16	11:45	2	2	0.364
17	12:00	1	1	0.137
18	12:15	1	1	0.123
19	12:30	1	1	0.129
20	12:45	1	1	0.129
21	13:00	1	1	0.129
22	13:15	1	1	0.129
23	13:30	1	1	0.129
24	13:45	1	1	0.146
25	14:00	4	2	0.498
26	14:15	4	4	0.849
27	14:30	4	4	0.874
28	14:45	4	4	0.874
29	15:00	4	4	0.874
30	15:15	4	4	0.864
31	15:30	2	2	0.499
32	15:45	2	2	0.500
33	16:00	2	3	0.576
34	16:15	2	2	0.500
35	16:30	2	4	0.793
36	16:45	4	4	0.883
37	17:00	4	4	0.880
38	17:15	4	4	0.883
39	17:30	4	4	0.883
40	17:45	4	4	0.883
41	18:00	4	4	0.883
42	18:15	4	4	0.836
43	18:30	1	1	0.129
44	18:45	1	1	0.129

の判断においては、制御パターンの変更は、パターン同志の順序関係とは無関係に行われているが、（たとえば「パターン1」→「パターン4」といった一度に多数のブースを閉じることもある）これに反してモデルにおいては、渋滞の延伸等の連続的な変化に対して、パターンも徐々に大きくなることに起因すると考えられる。

次にモデル内でパターンとして出力される前の制御レベルについて、時間変化を描いたものが、図3-16である。本モデルで出力される制御レベル値とは、先にも述べたようにファジィ推論プロセスの直接の出力値のことであり、「周囲の入力状況に対する交通管制担当者の判断を制御の必要性を感じている度合」を表現したものであると言える。従って本図からは、以下のようなことがわかる。

- ①制御パターンの変化は、この制御レベル値の変化に従って得られるため当然時間的な変化も同様な形状となるが、最終的に判断結果が同一の制御パターンとなっても、考えられている必要性の異なる点がいくつか見られる。
- ②制御のレベルが大きく変化する過渡的な部分では、認識している制御の必要性が徐々に変化してゆく過程が、図中の比較的なめらかなレベル変化より読み取れる。
- ③本図から、「パターン1」(制御を行わない)の場合と「パターン4」(最も強い制御)の場合には、制御継続中その必要性は、大きく変化しないということがわかる。

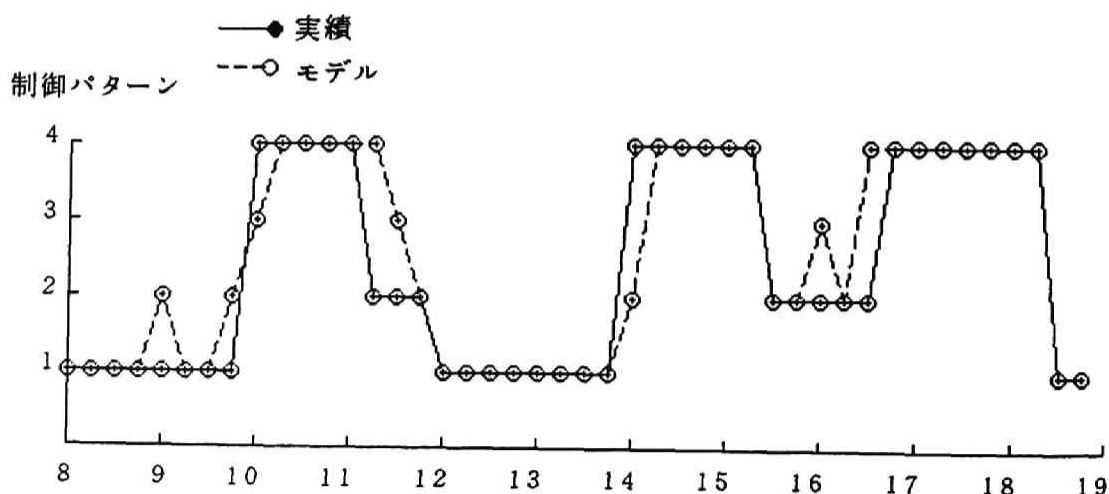


図3-15 モデルと実績の制御パターン

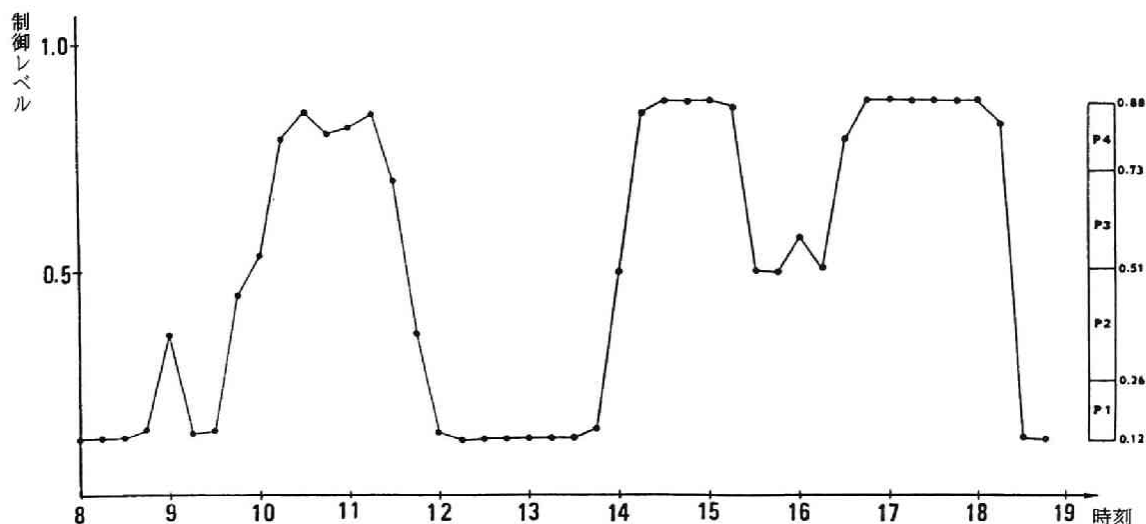


図3-16 制御レベル値の時間変化

3-3-8 モデルの各種検討

ここでは従来のモデルを改良するために、いくつかの検討を行うが具体的には先に述べた判断過程におけるファジィ推論に用いるメンバシップ関数および合成法についての検討を行う。これらの検討は推論を行う過程の意志決定手順のモデル化から考えて重要なことである。

(1) ケーススタディ

このモデルの妥当性については、当該路線の他の日のデータについても説明可能であることを調べる必要がある¹⁴⁾。ここでは、表3-11に示すような交通制御状況の異なるケースを設定した。ケース1は通常よく生じる「パターン2」と「パターン4」の生起した状態、ケース2は「パターン4」がなく、午前中に2度の制御の行われたケースである。

実際の計算にあたっては、モデルの構造を規定するパラメータなどは一定とし、入力データを当該日時のもので計算を実施した。この計算結果を管制パターンの変化として示したものが図3-17および図3-18である。ケース1では制御パターンの変化時に判断の差異を生じている。また、ケース2では、全体として実際の判断よりも若干レベルの高い制御

表3-11 ケーススタディのためのデータ

No.	月日	時刻	制御パターン変化
1	11.21	8:00~12:45	1→2→4→1
2	1.23	8:00~12:00	1→2→1→3→1

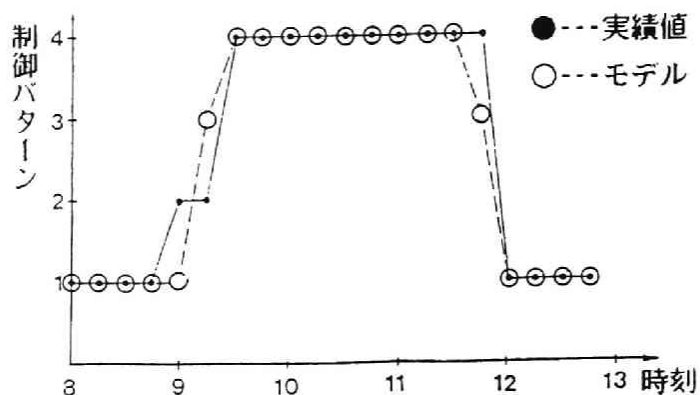


図3-17 ケース1の計算結果

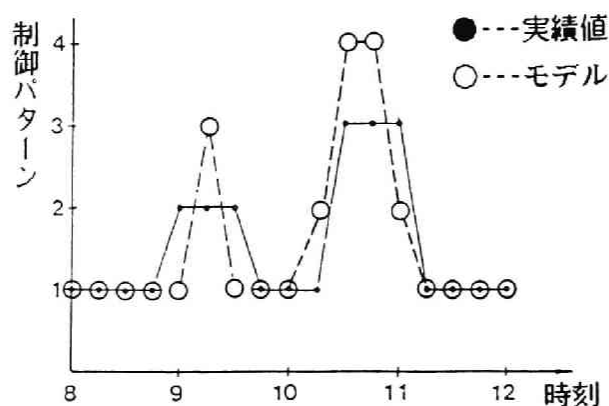


図3-18 ケース2の計算結果

パターンを出力している。これらの結果からモデルの性質として以下のことがわかる。

- ①ファジィ制御モデルによる判断結果は全体的に実際のオペレータの判断に追従しており、代替的に判断を行いうることがわかる。これはさきに作成した基本モデルの妥当性を示すものである。
- ②両ケースのモデルが判断を誤った時点についてみると制御パターンの変更時に多少のずれが現れている。ただこの場合にもパターンとしての誤りは最大1段階であり、それほど大きくはない。
- ③ケース2のような通常のパターンと比較的異なった交通状況が出現した場合には判断を誤ることが多い。これは主として「ある制御パターンを2度以内の短期間で変更することはない。」といった現実的なルールの欠如が原因であると考えられる。

以上のことから、当初に設定した単純な5つのルール群を用いて、実際の交通制御時の

判断を比較的良好に表現できることがわかった。

(2) メンバシップ関数の比較検討

ファジィ手法を検討するうえで最も重要な概念は、集合をメンバシップ関数によって表現することであり、これがファジィ集合の創始者である L.A.Zadeh の提唱した中心的な話題でもある。これはファジィ推論を構成する場合においても必要不可欠なことであり、実際にも検討が進められている。ただメンバシップ関数は、確率分布関数を設定する場合のように、「サイコロを振って6の目が出る確率は $\frac{1}{6}$ 」というように論理的性質にもとづいて求めることは難しい。とくにファジィ推論の場合には、正しい推論結果を導きまた実際の人間の感覚に適合したものを実証的に求める必要がある。メンバシップ関数には、種々の形が考えられるが、一般にいろいろな面の研究に用いられている図3-19に示すような3種の関数形の比較を行う¹⁵⁾。これらの関数は、一般的ないくつか関数を代表している典型的なケースであると考えられる。

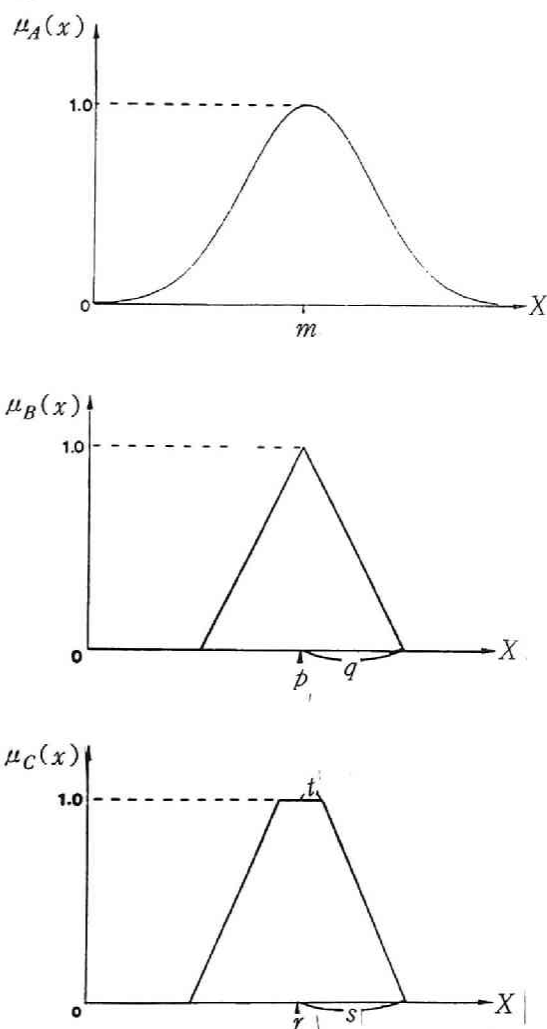


図3-19 メンバシップ関数の比較

- (a) 中央値 m の周辺に鐘状に分布する形状であり、中央値 m と分布の広がり的大小を示す σ の2つのパラメータで、分布形状の差異が表現されるものである。[正規型]
- (b) 中央値 p を頂点とする三角形分布である。 q は底辺部の幅であり、 x とそのメンバシップ値 $\mu_B(x)$ の関係が(a)に比べ操作しやすく、パラメータの設定、検証の際に有利である。[三角形型]
- (c) 台形状の分布であり、中央値 r 、底辺部の幅 s 、頂辺部の幅 t の3つのパラメータを用いる。この関数は(a)の特徴である中央値付近の変化のゆるやかさと(b)

の操作性を兼ね備えたものである。 $t = \alpha s$ (α は定数) という関係を与えれば、

2つのパラメータで表現できる。〔台形型〕

ここでは実証的に、過去の研究で作成されたモデルを用いて各関数の特徴を比較検討する。実際の比較のための関数の設定は以下の2点を留意して行う。

①重心の位置が等しい。すなわち

$$x_G = x_D \quad x_G : \text{正規型関数の重心} \quad (3-7)$$

x_D : 台形型関数、あるいは三角形関数の重心

②判断の変化程度が等しい。すなわち、変曲点における関数の傾きが等しい。

$$[d\mu_A(x)/dx]_{x=x_0} = [d\mu_D(x)/dx] = \text{const.} \quad (3-8)$$

x_0 : 正規型関数の変曲点

$d\mu_D(x)/dx$: 台形型分布の脚部の傾き、あるいは三角形の傾き

このように設定することで、分布形状の類似した関数とすることができ、実際のモデルの判断結果にはほとんど影響を与えず、新しいモデルを作成することができる。この台形分布は正規型の関数に比較して関数の設定が容易であり操作性が高いといえる。これは今後のモデル改良の可能性を示すものである。

詳細な関係は省略するが、曲線と直線の差異は大きくない。このパラメータを使用して、関数を変更したモデルの判断程度についての比較を行った。これらより、関数(b)(c)は出力レベルの値が特定の値に集中しやすく、一部のルールのみが反応していることがわかる。一方、関数(a)では出力値が多様な値を取り、複数ルールの反応により出力値が算出されていることがわかる。これは関数の特徴に起因するもので、正規型の関数の場合にはその性質上 $\mu(x)$ の値が0にならない(無限大、無限小となったとき0となる。実用的な計算機での出力でいえば、かなり大きな値をとっても0とならない) ことによるものである。

(3) ファジィ合成法の比較検討

メンバシップ関数の他に重要なものとしてファジィ推論演算の設定がある。これには、ファジィ関係作成のための合成法の検討が必要である。現在までに、この点については統

合的な研究が行われており、とくに T -norm の理論については多くの研究がみられる。

まずここでは簡単にこの理論についての説明を行うことにする¹⁶⁾。

T -norm (triangular norm) T は、

$$T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

なる関数で、次の条件を満たすものである。

$$(1) \quad T(x, 1) = x \quad (\text{単位元の存在}) \quad (3-9)$$

$$(2) \quad x_1 \leq x_2 \text{ ならば } T(x_1, y) \leq T(x_2, y) \quad (\text{単調性}) \quad (3-10)$$

$$(3) \quad T(x, y) = T(y, x) \quad (\text{交換性}) \quad (3-11)$$

$$(4) \quad T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z) \quad (\text{結合性}) \quad (3-12)$$

一般にこれらの条件を満たす T はファジィ推論の演算として用いることができる。そして実際には多くの T -norm を定義することが可能である。ファジィ推論を制御に応用したファジィ制御の分野においてもいくつかの方法が提案されているが、一般的なものはずで示したように①minと②積の演算である。

具体的には、

$$\mu_{A \rightarrow B}(x_0, y) = \mu_A(x_0) \wedge \mu_B(y) \cdots \cdots \text{Mamdani} \quad (3-13)$$

$$= \mu_A(x_0) \cdot \mu_B(y) \cdots \cdots \text{Larsen} \quad (3-14)$$

と記すことができる。

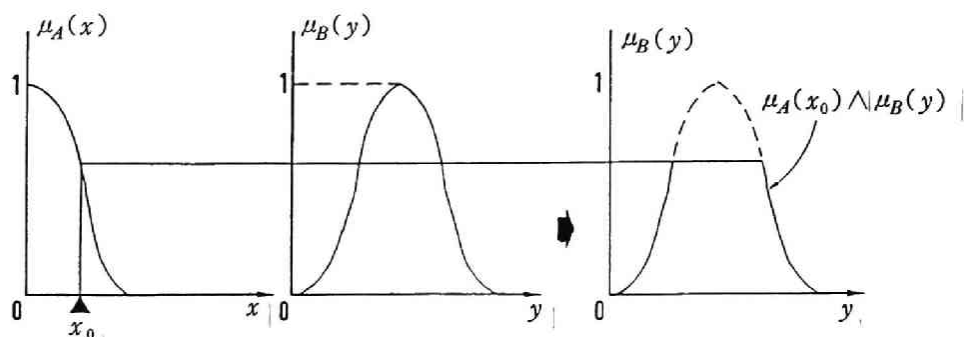
前者は「論理積」ともいわれる演算である。ファジィ推論のプロセスにおいては $\mu_A(x_0)$ によって出力分布の上限を規定するものであるといえる。後者は「代数積」ともいわれる演算である。これもある要素 x, y について定義すれば以下のようなものである。 $x \cdot y = xy$ この演算を二つのメンバシップ関数の分布形に当てはめる場合には、これは分布全体の大小を規定する演算となっているといえる。

これらの実際の演算結果の差異は、図 3-20 に示すようである。これらはその演算方法を比較すればわかるように、前者は各ルールの成立の可能性 $\mu_A(x_0)$ を結論 $\mu_B(y)$ の上限として用いることに対し、後者はこれを積の形で用いており一種の重みと考えていることが分かる。

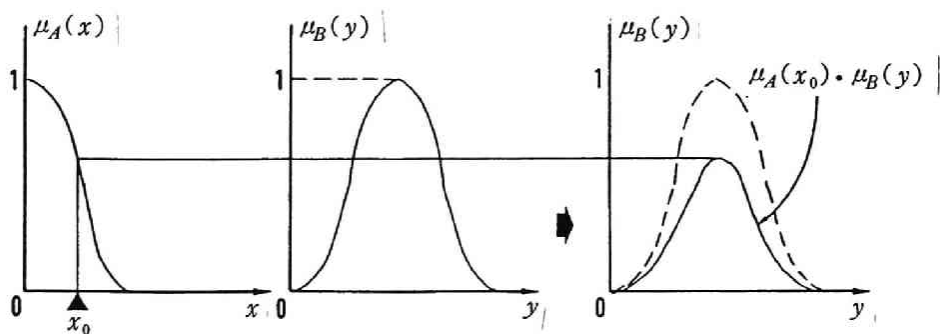
この結果より、積演算を用いると出力値が高レベルの値から低レベルの値まで広い範囲の値を取っているため、最終的な判断結果としての推定制御パターンで1と4が現われやすいという結果が得られた。逆に、min 演算では、出力値が比較的均等に分布しているため、制御パターンの出力結果もレベルの高低の順に連続的に変化する特徴がある。

(4) パラメータの決定方法について

モデルのパラメータ決定にあたっては、今回のようにパラメータの範囲を限定し総当たり的に求める方法とその範囲内に乱数を発生し探索する方法が考えられる。後者については、前章と同一のモデルについて検討した例があり、判断の適合性からみて若干の改良となることが報告されている¹²⁾。(適合率が0.848) 一般に乱数を用いた方法によればパラメータの詳細な部分の検討が可能であるが、解の探索の偏りなくするためには十分な繰り返し回数が必要となるため、多大な計算時間を要するという欠点がある。



(1) min オペレーション



(2) 積 オペレーション

図3-20 演算方法の比較

(5) 関数のファジィ度について^{6),15)}

本モデルはファジィ推論といった知識工学的方法を用いて、人間の判断を記述するものであるが、ここでは、モデルに内在するファジィ性を検討することで実際の判断に含まれるファジィ性を知ることができる。普通メンバシップ関数のファジィ度を計算する方法がいくつか知られているが、ここでは実用的な方法として、Kaufmannによる定義を用いる。この定義によればまず集合間の“近さ”を測るものとして、相対的ハミングの距離を導入している。全体集合 $S = \{x_1, \dots, x_n\}$ としてこれを

$$h(A, B) = \frac{1}{n} \sum_{i=1, n} |\mu_A(x_i) - \mu_B(x_i)| \quad (3-15)$$

のように定義する。

ここであるファジィ集合 A に対して、相対的ハミングの距離の意味で最も近いようなふつうの集合を定義し A° とするとこのメンバシップ関数は

$$\mu_{A^\circ}(x) = \begin{cases} 0 & \mu_A(x) < \frac{1}{2} \\ 1 & \mu_A(x) \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3-16)$$

となる。(この集合 A° を1/2カット集合という) ファジィ度は相対的ハミングの距離および A° を用いて

$$\begin{aligned} d(A) &= 2h(A, A^\circ) \\ &= \frac{2}{n} \sum_{i=1, n} |\mu_A(x_i) - \mu_{A^\circ}(x_i)| \end{aligned} \quad (3-17)$$

として求めることができる。先のモデルで用いたメンバシップ関数に対してファジィ度を計算することができる。この関数では σ の値によってファジィ度は変化する。これを示したものが図3-21である。これより、この関数では $\sigma \doteq 0.3$ のとき $d \doteq 0.5$ でピークをむかえることがわかる。今回の基本モデルでは、 $\sigma = 0.15$ でありこのとき $d(A) = 0.31$ である

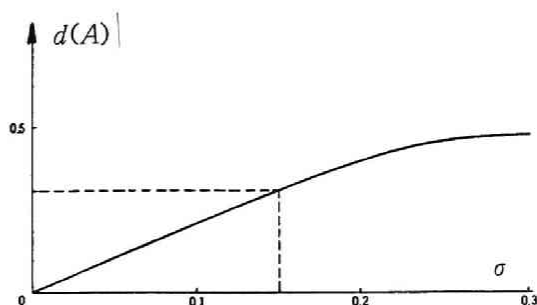


図3-21 σ とファジィ度との関係

ことからファジィ度としてはかなり大きい値となっていることがわかる。このようにモデ

ルを通じて判断のファジィ性の程度を知ることができることがわかった。

本章ではファジィ制御モデル改良のためのいくつかの検討を行った。これらの他に、ルール群の構成の変更の影響¹⁶⁾、ファジィ分布から確定値への解釈変換法など検討等があるがここでは省略する。

3-4 ファジィ流入制御モデルの実用的改良

3-4-1 モデル構造の改良

本節では、前節で検討した結果をもとに、ファジィ交通制御モデルの改良を行う。ここで改良を試みるための視点は、①対象データの変更、②入力変数の検討、③ルール構成の検討、④メンバシップ関数の変更である¹⁷⁾。

(1) 対象データの変更

本研究ではモデルの実用性向上のために、平日の恒常的な交通現象を基本とするがさらに多様な交通状態を包括して考えることができるように、データを再度抽出した。実際に抽出したデータの属性を表3-12にまとめる。基本モデルの場合と異なり、対象データに

表3-12 モデル対象データの属性

月 日	2月28日	10月5日	11月18日
時 間	8:00~12:00	8:00~12:00	8:00~19:30
断 面 数	20	20	47
制御パターン	1-4	1-4-3-1	1-2-4-1-4-1
備 考		土曜日	交通障害有

は、平日及び交通量の比較的少ないと思われる土曜日が含まれている。また偶発事象発生時の制御を考慮するため、ある時間帯に交通障害の影響の出ている日（昭和60年11月18日データ）が含まれている。交通制御の判断は15分ごととするため、全部で84断面のデータを用いていることになる。

(2) 入力変数の検討

基本モデルでは入力変数として「渋滞長」と「交通需要量」が用いられていたが、これ

らに加えて実際の管制担当者が制御パターン決定における判断材料としており、かつ重要と考えられる以下の要因のモデルへの入力を検討した。これは判断プロセスの精ち化を目指すものである。

〔流入交通量〕

各入路での流入交通量は5分ごとに累積され渋滞長と同様に常時表示されており、実際の流入制御の判断材料の一つになっている。ここで各入路の属性を考えると、過去の実績データより堺、住之江、玉出各入路の流入交通量の比は約3:1:1であることがわかっている。流入する交通量が多いこと、環状線のまでの距離がオンランプ中最も大きいこと全線を通過する交通が含まれる可能性が高いことから、堺入路は堺線の交通状態に与える影響が最も大きいと思われる。また実際の制御時にも、この路線では管制担当者が最も注目している箇所である。そこで本モデルでは、堺入路の流入交通量を15分毎に集計したものを交通制御モデルを作成する場合の流入交通量のデータとする。

〔制御継続状態〕

順次計測されている外部からの情報に加えて、その時点までの制御継続状態も判断材料の一つである。すなわち計測された各種計測指標が同じ値であっても、すでに制御を行っている場合と制御を行っていない場合では判断が異なるということである。本研究におけるモデルの入力変数としてはパターン1を無制御時点、その他のパターンを制御実施時点と考え、継続した制御時点数を制御継続状態を表す変数とする。

（3）ルール構成の検討

次にルール構成について検討する。ルール構成はモデルの挙動を基本的に規定するもので、現況の正確な把握のもとに作成される必要がある。

- ①制御の判断に最も影響を与えるものは渋滞長である。これは現在、実際に用いられている交通管制パターン表の設定からも明らかであり、交通制御全体の判断として、渋滞長が長ければ他の入力情報にあまり依存せずに制御レベルは大きく、渋滞長が短ければ制御レベルは小さいと判断されていると思われる。
- ②交通需要量、流入需要量などの制御判断時間帯の交通量に関する情報は、渋滞長が中程度の時に、今後渋滞が収束するか延伸するか判断に用いられ、これが最終的な制御レベルの判断に用いられていると思われる。たとえば、渋滞はそれほど延伸していなくて

も大きな交通需要が予測される場合には制御レベルを高くすることもあるということである。

③偶発的事象発生時の制御

偶発的事象には交通事故、故障車、落下物等が考えられる。これらは道路容量の低下を招き渋滞発生の原因となる。制御の判断材料としては、現場からの情報の他、事故発生地点からの渋滞長が考えられる。事故等の道路に与える障害の程度と交通量の総合的な情報として、その渋滞長は重要であり、平常時に観測される自然渋滞の渋滞長と同等に扱われていると思われる。

以上3点を考慮して、図3-22に示すようなルール構成を作成した。基本モデル作成時の判断構造を用いて、さらに管制担当者が認識としてもっていると考えられる交通需要量と実測結果である流入交通量を明確に区別して用いている。またこのモデルでは上記③に対応して偶発事象の場合の判断を含むためにルール1およびルール2が加えられている。

(4) メンバシップ関数の同定

前節での考察より、パラメータ設定の容易さ、操作性よりメンバシップ関数形としては台形のものを用いた。上述のルール構成より本モデルでは、渋滞長および出力変数に対してはメンバシップ関数として「大」「中」「小」の3段階を考え、交通需要量は「大」、流入交通量は「大」「大でない」を考える。これらの関数を図3-23～図3-27に示す。それぞれ関係は図に示すようであるが、このうち「大でない」については「大きい」というファ

```

RULE 1: IF    ACT    on
           AND CON   ge(LAC) THEN CON  CON
RULE 2: IF    ACT    on
           AND CON   lt(LAC) THEN CON  LAC
RULE 3: IF    CON    short THEN LEVEL low
RULE 4: IF    CON    long  THEN LEVEL high
RULE 5: IF    CON    medium
           AND FLW    big   THEN LEVEL high
RULE 6: IF    CON    medium
           AND FLW    not(big) THEN LEVEL medium
RULE 7: IF    AFT    on
           AND CON    not(zero)
           AND DEM    big   THEN LEVEL high
RULE 8: IF    LCN    on    THEN LEVEL low
  
```

[variables] ACT:事故渋滞の有無, AFT:既渋滞の有無,
CON:渋滞長, DEM:期待交通需要量, FLW:流入交通量,
LAC:事故渋滞長, LCN:低制御継続の有無, LEVEL:制御レベル

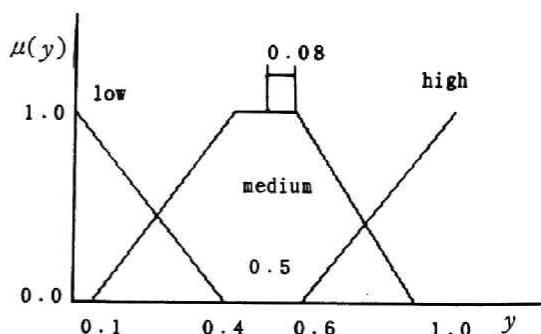


図3-23 制御レベルのメンバシップ関数

図3-22 改良モデルでのルール構成

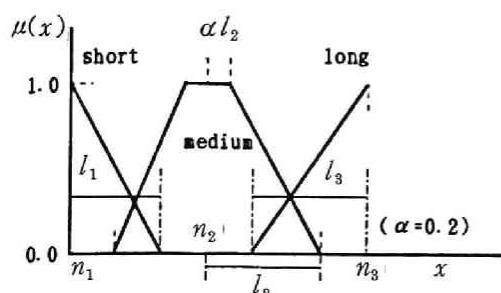


図 3-24 渋滞長のメンバシップ関数

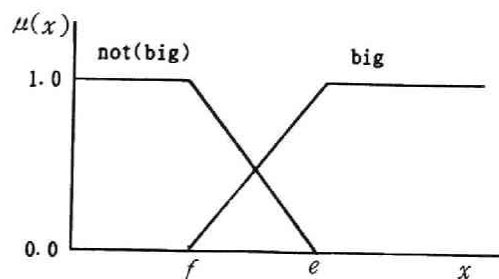


図 3-25 流入交通量のメンバシップ関数

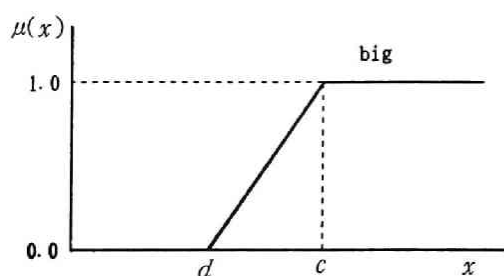


図 3-26 交通需要量のメンバシップ関数

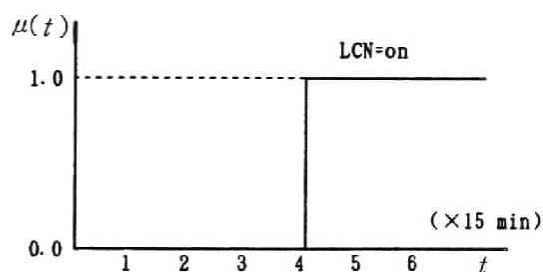


図 3-27 制御継続状態のメンバシップ関数

ジ集合の補集合を考えることになるが、この場合は比較的簡単な定義を用いた。すなわちあるメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ を持つファジィ集合 A に対して補集合のメンバシップ関数を $1 - \mu_A(x)$ として表現するものである。

(5) モデルの決定

次にモデル決定のためにパラメータの推定を行う。ここでのパラメータは前述のメンバシップ関数の図中に個別に示されている。ファジィ変数の増加に伴い、基本モデルに加えてパラメータ数は当然増加している。またパラメータの探索にあたっては、基本モデルにおける場合とおなじく、モデルの適合性を基準とし、ここでは図 3-28 に示すような段階的な方法に依ることにした。前述したように判断構造において渋滞長が最も重要な判断材料になっていることを考慮して、第 1 ステップ

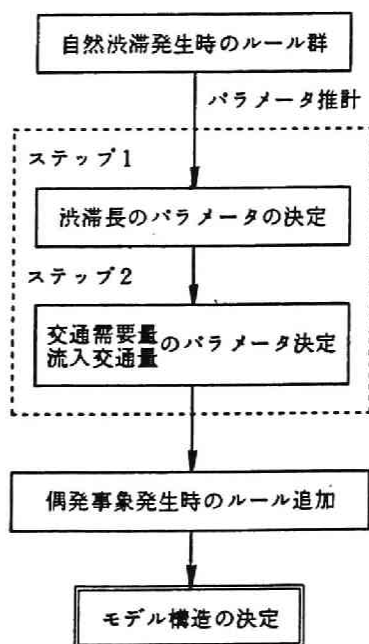


図 3-28 パラメータ決定のためのフロー

ではルール構成を単純化したものを用いて渋滞長に関するパラメータを決定する。そして第2ステップで他の入力変数のパラメータを決定するという2段階の手順を踏んでいる。

このような2ステップ探索手順を用いてモデルに必要なパラメータが決定された。第1のステップにおいては適合率0.805を示しているパラメータ群が採用され、とくに渋滞長についてのパラメータ値が決定される。さらに、上記の方法によりその他のパラメータを探索した。このステップにおいても、適合率

として全断面数に対するモデルによる判断の合致した断面数の比率を求め、この最大となる場合のパラメータの組合せを採用した。このようなプロセスを経て最終的なパラメータが求められた。この値をまとめて表3-13に示す。

表3-13 パラメータ推定結果

項目	渋滞長	交通需要量	流入交通量
パラメータ値	$n_1 = 0.0$ $l_1 = 1.5$ $n_2 = 2.7$ $l_2 = 1.35$ $n_3 = 4.5$ $l_3 = 1.35$	$c = 1.80$ $d = 1.50$	$e = 610$ $f = 580$

(6) モデル再現性の検討

これまで述べてきた方法によって、パラメータが改良されたファジィ制御モデルが同定された。ここでは、モデルの現況再現性を検討する。まずモデルによる判断の出力結果を時間の変化とともに図示したものが図3-29～図3-31である。

これらを見ると制御パターン変化の際に現実との判断と若干のずれが見られるが、全体として良好な再現性が得られていると思われる。また全断面に対する適合率も0.91であり高い値となっている。またケースごとの検討すると、各ケースごとの適合率はいずれも高く11月18日がこの3ケースのうちで最も適合率は悪いが、このケースでも適合率は0.87となっている。

全般的な傾向として対象とした3つのケースにおいて判断結果の大半では、制御の開始、終了時刻の実際とモデルの判断のずれは1断面(15分)になっており、このモデルが実際の交通状態の変化に対して十分対応できることを示している。判断の誤った場合としては、例えば11月18日の14時付近は入力データを見ても渋滞長は短く、モデルからは「パターン1」が出力されるが、実際には渋滞延伸の予防的な意味で「パターン4」の制御が行われたのであろう。今後モデルを改良する際には、この渋滞予防的な判断など、これまでのルールでは網羅されていない判断ルールも含める必要があると思われる。

制御レベルとしての出力値に関しては、台形型の関数を用いたため、前項で述べたよう

に数種の特定の値が多頻度で現れているが、制御パターンの変化する前後では中間的な値が得られており、これにより実際の管制担当者の判断における制御レベルの推移を表すことが可能であると思われる。^{18),19)}

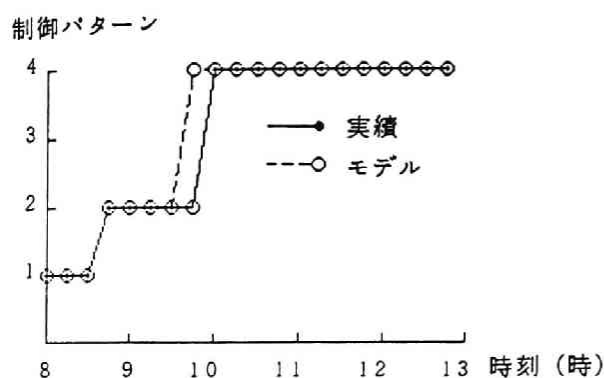


図3-29 モデルによる出力結果（2月28日）

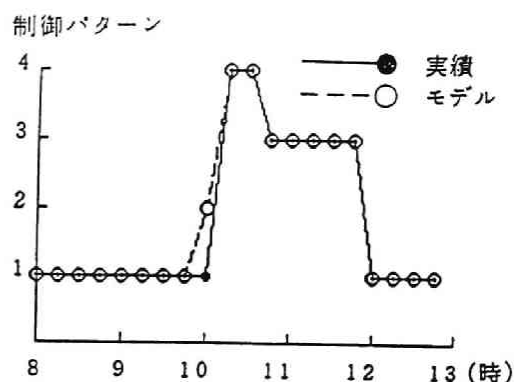


図3-30 モデルによる出力結果
（10月5日）

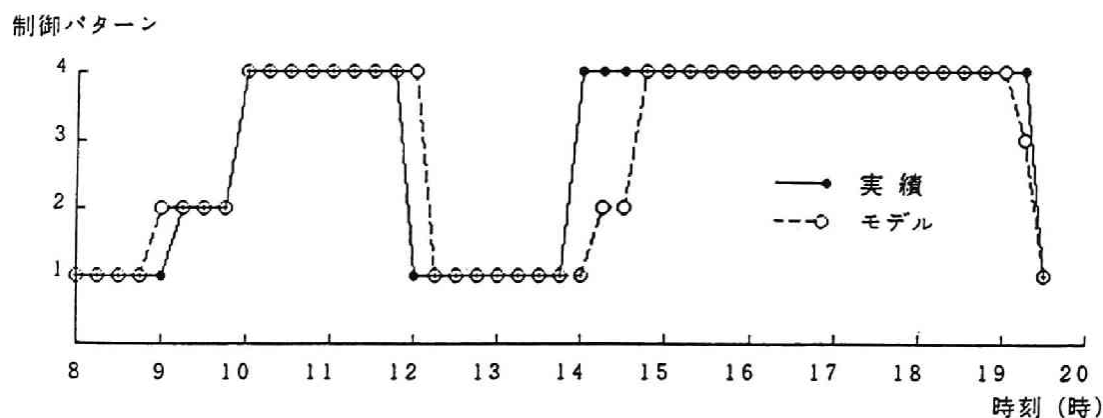


図3-31 モデルによる出力結果（11月18日）

3-4-2 ファジィ交通制御の実用的検討

本節では、本研究の最初に述べたように従来のファジィ交通制御モデルの改良課題の一つであった交通制御内容の評価に注目する。これは具体的には、ファジィ流入制御モデルと渋滞シミュレーションモデルを結合し、評価プロセスを内包した交通制御ルールの改良

検討に用いるためのモデルを作成することである。このようなモデルが作成されれば、ファジィ推論によって各種交通制御の定式化をおこないさらにこのモデルの制御の効果をなんらかの指標で検討することができる。したがってこれまで記述するだけのモデルであったが、評価が可能となるためこれを用いた制御内容の改良も可能なものとなる。

(1) ファジィ流入制御モデルの改良手順

いくつかの実用化されたシステムが示すように、ファジィ制御プロセスにおいては、初期に作成されたルール群によって実際に制御を行っても、必ずしも満足すべき効果を生み出す制御でない場合もあり、普通この初期ルール群によりフィールドテストを実施し、なんらかの方法で（現場で実地に行うフィールドテストが最も実用的である。）その有効性を評価する。さらにこの結果を踏まえて制御内容の不十分な点をルールの変更によって修正して行く方法が一般的である。

本研究においても基本的には同じ考え方に立つが、交通渋滞に対する制御モデルの場合には、実際の高速道路上で簡単にフィールドテストを実施することが出来ない。すなわち阪神高速道路であれば制御される交通流の影響が即座に大阪市域に伝達され、かならず現状よりよい結果を生み出すことが可能であれば問題はないが、状態を悪化させるような場合には現場での実施は非常に危険である。そこで、本研究では現場の交通状況の変化を再現できる渋滞シミュレーションモデルを利用することにする。

こうした状態のシミュレーションをおこなう改良プロセスを含む評価は、すでに従来の研究においても提案されており、その概要は図3-32に示すようなものである。この手順について簡単に説明を加える。

①初期状態として、適当なルール群を備えた

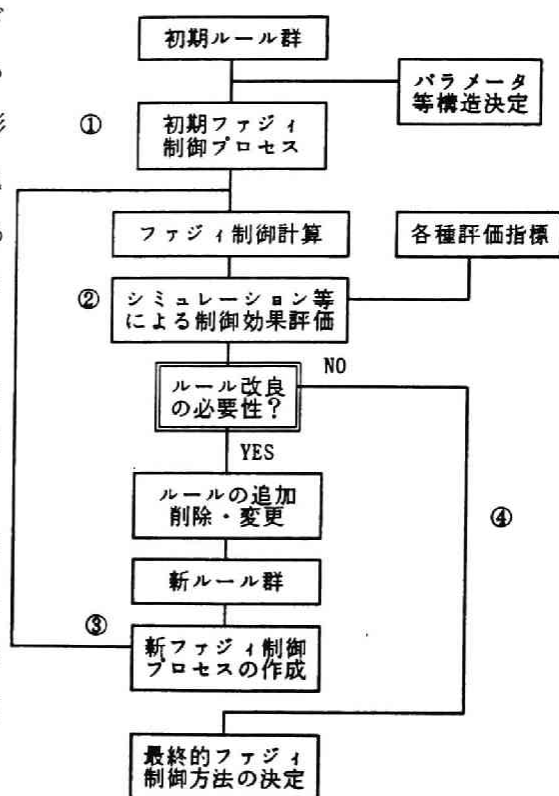


図3-32 交通制御ルール改良のためのフロー

初期ファジィ制御プロセスを作成する。本研究では前項において作成された基本的なモデルに含まれるルール群がこれに相当する。

- ②次にこれらのルールによる実際の制御判断を行い、設定された制御の妥当性を検討するために、各種評価指標を備えた渋滞シミュレーションモデルを用いて、交通状況の変化を見ることによって現ルール群の評価を行う。
- ③制御効果の評価結果とルールの合理性を検討し、改良が必要となる場合には、ルール群を再構成し新たなファジィ制御プロセスとして用いる。この場合ルール内で用いられているメンバシップ関数がもし不適当であればこの改良も必要である。
- ④逆にもしルール改良の必要性が無ければこれを採用する。これにより最終的なファジィ制御ルール群が構成されることになる。ただし最終的なファジィ制御方法の決定は制御に対する基本的方針にも関係するため、評価指標の選定と併せて検討すべきである。

(2) 評価のための渋滞シミュレーションモデル

(a) 渋滞シミュレーションモデルの構造

本研究で用いる渋滞シミュレーションモデルは、制御効果を比較、評価することが目的であるため、区間ごとに車を集計し、その区間の交通状態の推移を追跡するマクロモデルである。モデルの構造は阪神高速道路において交通渋滞対策案などの評価検討用に用いられている渋滞シミュレーションとほぼ同じであるが、本研究の目的に合致するようにいくつかの改良が行われている。基本的な点としては以下の2点である。

- ①大阪堺線を対象としているので単路部のモデルとなっている。このため構造は比較的単純であり、計算時間も大きくない。
- ②モデルの簡略化のために流入需要交通量をOD別に取り扱っておらず流入交通量から設定および算出する形となっている。

このモデルの概要を表3-14にまとめて記す。[1]ではシミュレーションの分割程度について述べているが、こうした渋滞シミュレーションモデルでは大半がここで示したものと同様な設定が見られる。[2]の分岐率は放射線上りを単路として取り扱いやすいようにするための設定である。[3]、[4]の考え方も従来型の渋滞シミュレーションモデルと大きく変わる点はない。[5]のK-V特性についても各種の設定が可能であるが、ここでは従来から阪神高速道路の渋滞シミュレーション中に用いられていた指数関数を用いる。表3-15は上記の構造に基づき各区間の条件をなるべく現実に接近するように設定したもの

表3-14 渋滞シミュレーションモデルの概要

- [1] タイムスライス：10秒，各区分割：200～400m
 区分内の交通状態は一樣とする
 [2] 分流部処理：1時間単位に分岐率を与える。
 [3] 上流より各区分の交通状態を順次算出する。
 [4] 当該区分流入量は交通需要量・受入可能量より決定。
 [5] 各区分の $K-V$ 特性

$$V = \begin{cases} \alpha \cdot \{1 - (K/K_j)^\beta\} & : V \leq V_f \\ V_f & : V \geq V_f \end{cases}$$

V_f ：自由速度， K_j ：区分 j の飽和密度
 α, β ：パラメータ

表3-15 渋滞シミュレーションでの区分条件

区間番号	区間長 (m)	交通容量 (台/時)	自由速度 (km/時)	臨界密度 (台/km)	パラメータ		備考			
					α	β				
1	---	----	----	----	----	----	ダミー区間			
2	200	3811	70.4	44.4	248.4	0.2090	堺集約入路			
3～20	200						区間NO. 413			
21	350									
22	200	3613	68.5	45.9	170.3	0.3006	住之江入路			
23～30	200						区間NO. 411			
31	300									
32	200	4140	68.6	42.7	500.0	0.1130	玉出入路			
33～42	200	4320					区間NO. 409			
43	350									
44	200		62.7	41.1	1684.0	0.0322	津守出路			
45	300	区間NO. 407								
46	200	4000					1486.8	0.0338	西大阪線分流	
47	200		67.9	42.5	500.0	0.1042			区間NO. 405	
48	250									
49	200	61.4					42.5	500.0	0.1042	芦原出路
50～53	200		55.6	42.5	500.0	0.1042				区間NO. 401
54～58	200									
59	350									
60	---	----	----	----	----	----	環状線合流部			

である。

なお最下流部処理としては、実測5分間断面交通量を受け入れ可能量として外生的に与えた。また流入需要量の具体的な算出法としては、実測流入交通量に昭和60年2月28日の実測待ち台数のデータを考慮して1時間単位で集計し、実際のモデル計算においては15分単位の交通需要量の形に修正している。

(b) 各種評価指標

この渋滞シミュレーションモデルによって渋滞発生時の都市高速道路の交通状況が計算され、この時実施されていた流入制御の効果を知らするための各種評価項目が求められる。本研究では渋滞シミュレーションモデルによって出力される各種変数のなかから制御効果の評価に利用可能ないくつかの要因を抽出した。以下にこれらの具体的内容と評価指標としての出力値について述べる〔いずれも5分ごとに出力〕。

〔渋滞状況〕

交通渋滞の変化として本シミュレーションモデルでは、各区分ごとの5分間単位の渋滞状況（渋滞か非渋滞か）が出力される。これにより、評価指標としては渋滞区分の区分長を連続的に足し合わせると渋滞長が求められることになる。したがって、この値を用いることで当該時間内での最大渋滞長等の渋滞の変化を知らための量を求めることができる。また渋滞継続時間や総渋滞量（渋滞区分長を時間断面ごとに累積したもの）などが求められる。

〔断面交通量〕

この渋滞シミュレーションは交通状態を区分ごとに求める構造となっているので当然のことながら5分間ごとの入路および区分断面交通量が得られる。たとえば入路における断面交通量を全時間で累積したものは、総流入台数となり、この値に入路から環状線合流部までの一台あたりの走行距離を掛けると総走行台キロの指標が算出される。

〔待ち行列台数〕

渋滞シミュレーションに与える交通需要量と流入交通量の関係から時々刻々の待ち台数を計算することができる。計算される待ち行列台数は、都市高速道路に流入することが不可能であった交通量と考えることができ、平面街路への交通制御の影響の指標とすることができる。またこの値を時間断面ごとに累積し、総待ち時間（台・時）として用いること

ができる。

〔各区間の旅行時間〕

このモデルでは各区間の旅行時間はモデル内で用いている存在台数の変化から求めることができる。これを用いると任意のランプ間の旅行時間は、両ランプ内の各区間の旅行時間を加算して求めることができる。したがって、渋滞の程度を所用時間として評価したものがこの値と考えることができる。また各入路ごとの旅行時間と流入台数を掛け合わせたものを累積すれば総旅行時間が求められる。

（c）モデルの現況再現性

さらに評価のための指標が正確に出力されるようにモデルを構築するため、このシミュレーションモデルの現況再現性を検討する。本研究で基本ケースとして対象としたのは、ファジィ制御モデル作成時に用いた昭和60年11月18日の場合である。この日の実際の渋滞状況を図3-33に示す。すでに述べたように、平均的な堺線での状況として早朝に玉出の合流部から渋滞が発生し、その後四ッ橋からの渋滞が延伸してこれに接続するという典型的な渋滞の状況である。ただし、記録にもあるように 10:30ごろから偶発事象（積載物落下）による渋滞が発生しているため、渋滞の先頭地点がこの時間帯は後方になっている。この日の現況を再現できるように諸定数を設定し、シミュレーションを実施した。ただし偶発事象に関しては当該時間帯において車線閉塞の情報を入力し、実際には対応する区間に一定の閉塞を外生的与えている。この計算結果である渋滞の延伸状況を図3-34に示す。

この渋滞状況図から渋滞シミュレーションモデルの現況再現性を検討する。渋滞状況の実績値と計算値を比較すると、午前11時ごろの環状線合流部を先頭とする渋滞の発生時刻が多少早期になっていることがわかる。その他の時間帯では渋滞の延伸状況には大きな差異はなく、また偶発事象による渋滞の変化の様子も表現されていることがわかる。これらのことから、この渋滞シミュレーションモデルからは、ほぼ良好な現況再現結果が得られていると思われる。

（3）流入制御評価モデルの作成

ここでは前項で述べた渋滞シミュレーションモデルと流入制御モデルを結合して、評価プロセスを内包した結合モデルを作成する。このときのモデルの全体構成とその評価計算プロセスを概略的に示したものが図3-35である。

環状合流 玉出 住之江 堺集約

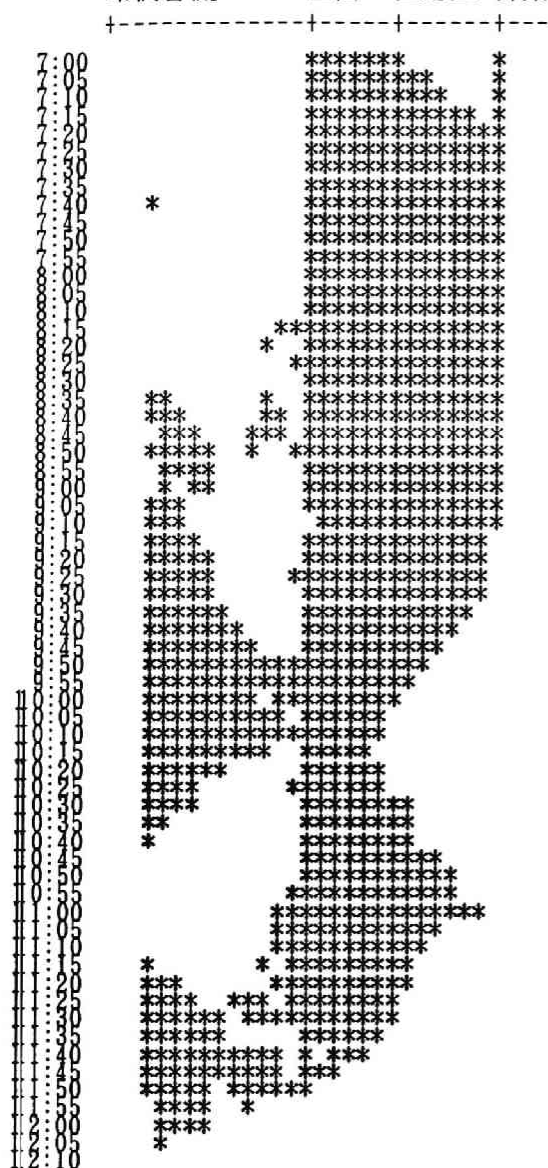


図3-33 渋滞発生状況

環状合流 玉出 住之江 堺集約

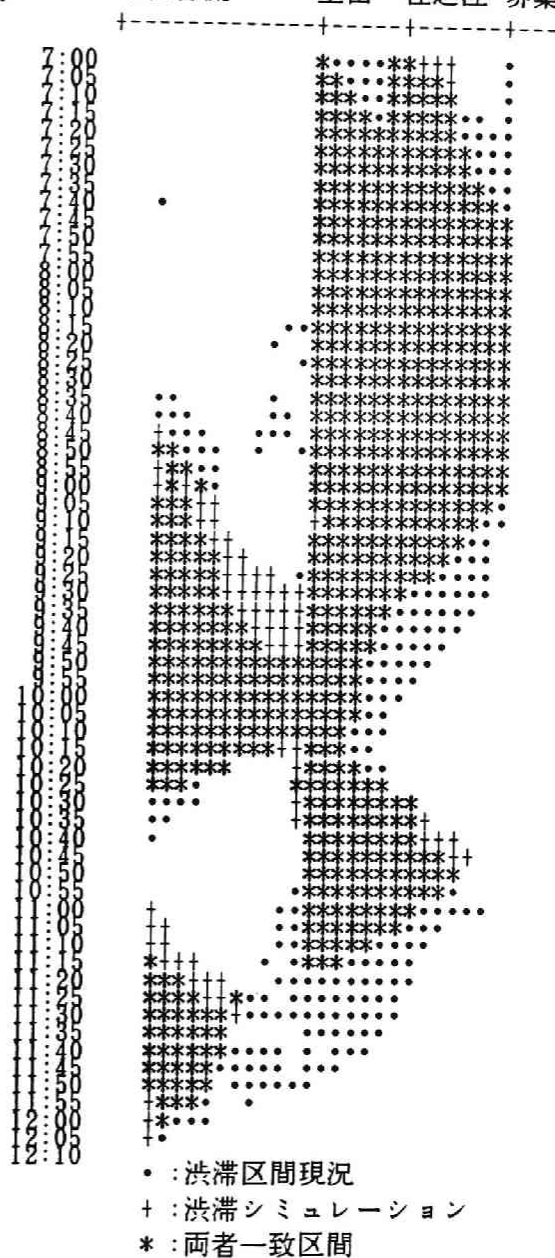


図3-34 渋滞シミュレーションの現況再現

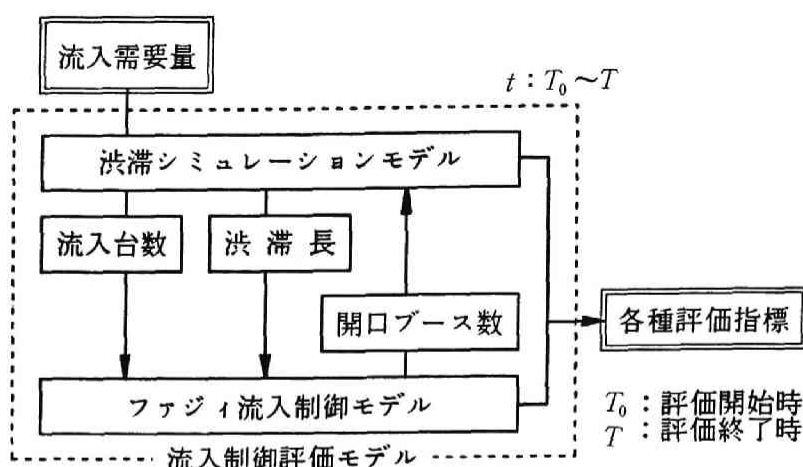


図 3-35 流入制御の評価手順

本図に示すように、まずこのモデルに外生的に流入需要量を与えると、渋滞シミュレーションモデルから5分ごとの交通状態が出力される。したがってこれを現実の交通状態の変化がシミュレートされたものと見なすことができる。この出力される交通状態の中には、渋滞状況や各入路の流入交通量が含まれており、これらより流入制御モデルへの15分ごとの入力としての変数である渋滞長、流入交通量が得られることになり、これらを用いて「ファジィ制御モデル」の判断プロセスを用いることができる。ファジィ流入制御モデルはこれらの入力より、15分ごとに制御パターンを出力する。この値は実際の制御行動としては開口ブース数に変換される。すなわちここで新たな制御の実施が行われたことになりランプの開口数の変化という形で渋滞シミュレーションモデルに入力される。この後は同様な手順が繰り返される。

この結合モデルを用いて、ルールを変更しない場合の制御行動および交通渋滞状況を算出し基本ケースを作成した。外生的な流入交通量としては昭和60年11月18日のデータを用いた。平常時の交通制御を評価することを目的としたため、前節で示した当該日に発生した車線障害の要因は除外している。したがってファジィ制御モデルでの偶発事象に関するルール（ルール1，2）は当該モデルには含まれておらず、また渋滞シミュレーションモデルにおける偶発時の閉塞設定も除かれている。この際のモデルからえられる交通状況を図3-36に、各評価指標の項目とその値を表3-16に示す。今後のファジィ制御による交通制御プロセスを検討する際はこの値を評価基準と考えることにする。なお評価はデー

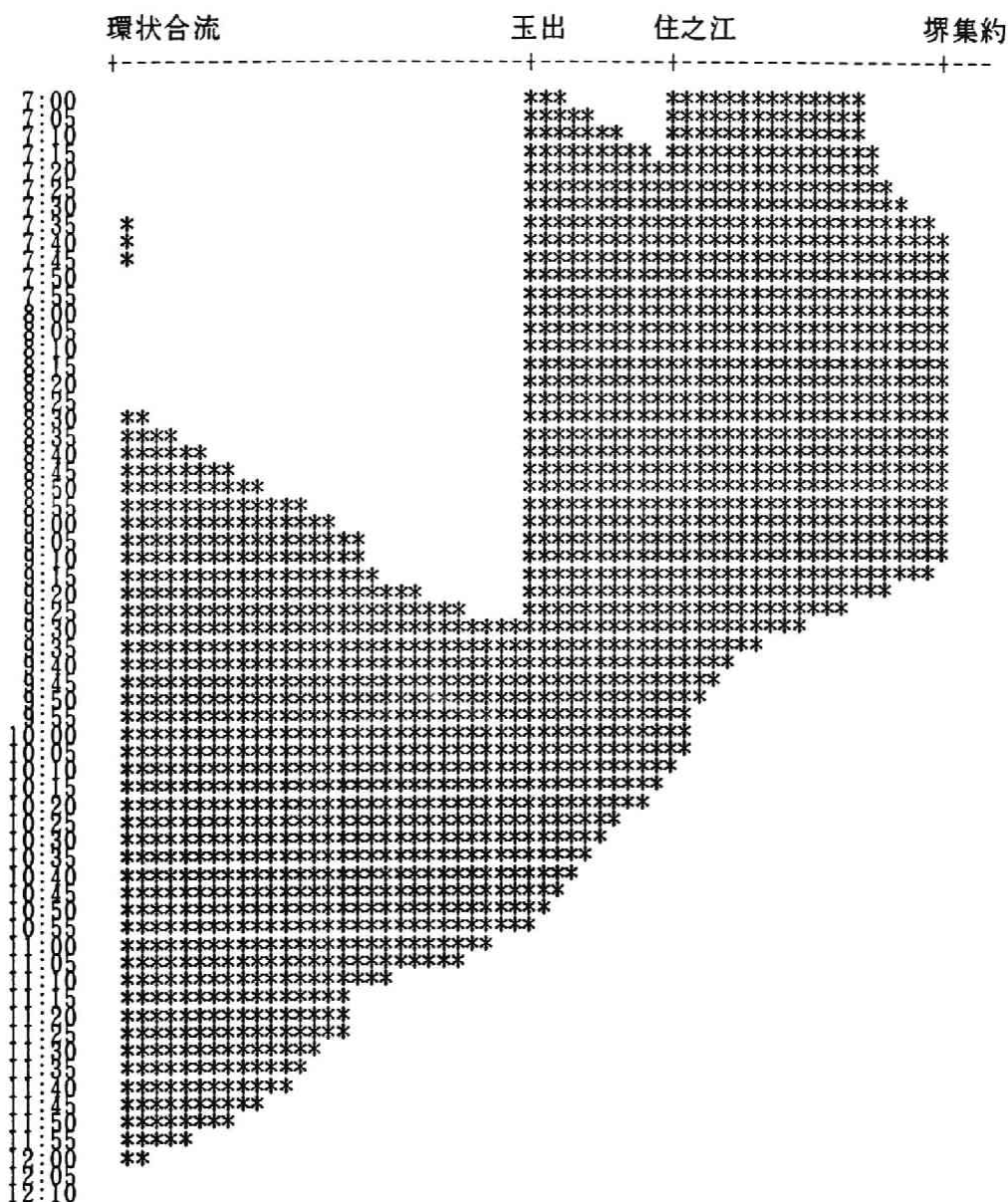


図3-36 評価基本ケースの渋滞状況

タにしたがい午前7時から午後1時までの時間帯で行うことにする。

(4) モデルによる交通制御効果の評価

ファジィ流入制御モデルにおいて、交通制御方法を検討、改良する時には次の2つの方法がある。これは一般のファジィ制御モデルにも共通する考え方である。

第1は推論プロセスに含まれている入力情報変換プロセスの変更、つまり各種入力のメンバシップ関数を変更する方法。第2はファジィ推論プロセスの中の判断内容を記述したルール群の構成を変更する方法である。

ここではこのようなモデルの改良方法を踏まえて次のような具体的な検討を行う。第1には渋滞長に対する認識の程度を変更するために、渋滞長のパラメータを変化させて制御効果を検討する。これはメンバシップ関数の変更方法の一例であると考えることができる。第2には制御継続時間に関するルールを変化させる。これは判断の内容の変更のうち比較的容易なものを設定したものである。またさらに第3として、現在行われている制御よりもレベルの高い制御を想定し、これを実施するためのルールの追加の方法について検討する。これは、最終的なモデル構造の変更にもつながり最も現実的なものである。以下それぞれの検討を行うことにする。

表3-16 基本ケースの各評価指標値

3-4-3 交通制御内容の変更と評価

(1) 渋滞長に対する認識の変化について

ここでは渋滞長に関するメンバシップ関数を変化させることによるモデルの挙動の変化を調べ、制御内容の検討を行う。具体的には渋滞長のパラメータを変更し、渋滞状況や各種評価項目の比較を行う。

渋滞長のパラメータを変更することは、ファジィ推論の枠組みにおいては「メンバシップ関数の変更」ということになるが、実際の制御においては、渋滞長に関する認識の程度を変更することに相当する。

ここでは渋滞長に関して現在よりも短い場合にもレベルの高い流入制御を実施する場合を検討する。具体的には渋滞長に対して「長い」とする判断基準（メンバシップ関数値が1となる点）を3 km、4 kmとし、これに

①	流入交通量 [堺] (台) [住之江] [玉出]	16231 4183 4738
②	最大渋滞長 (km)	9.0
③	最大待ち台数 [堺] (台)	198
④	総渋滞量 (km)	31.3
⑤	総旅行時間 (台・時)	7947.5
⑥	総走行台キロ (台・km)	257971.8
⑦	総待ち時間 [堺] (台・時) [住之江] [玉出]	233.0 0.0 0.9
⑧	制御継続 [堺] 時間 (時) [住之江] [玉出]	2.5 3.0 3.0

表3-17 渋滞長の変化に
対するパラメータ

n_3	4.0 (km)	3.0 (km)
n_1	0	0
n_2	2.4	1.8
l_1	1.3	1.0
l_2	1.2	0.9
l_3	1.2	0.9

応する表3-17に示すようなパラメータを用いて計算を行う。すなわち渋滞長の「長い」という認識が変化することによって全体の関数構成が変化する。そこでこれを各パラメータの変化として示したものである。これにより、実際の制御がある程度の渋滞を容認するような内容になっているのに対して、現在の制御内容より渋滞長の値が小さくても「長い」とするいわば強い制御を行った場合に、交通状態がどのように変化するかを検討できる。

このような視点から計算した具体的な結果として、それぞれの場合の各種評価項目を表3-18に示す。また基本ケースとの制御パターンの出力結果の比較を図3-37および図3-38に示す。さらにこのときの渋滞シミュレーションモデルより得られる渋滞状況を図3-39と図3-40に示す。

表3-18 渋滞長認識の変化に対する評価

No	評価指標	$n = 4.0$ (km)	$n = 3.0$ (km)
②	最大渋滞長 (km)	8.6(-0.4)	8.6(-0.4)
④	総渋滞量 (km・時)	31.0(-0.2)	30.9(-0.4)
⑤	総旅行時間 (台・時)	7900.1(-47.4)	7889.9(-57.6)
⑦	総待ち時間 [堺] (台・時) [玉出]	246.3(+13.3) 33.2(+32.3)	252.5(+19.5) 33.2(+32.3)
⑧	制御継続 [堺] 時間 (時) [住之江] [玉出]	2.75(+0.25) 3.25(+0.25) 3.25(+0.25)	3.00(+0.50) 3.50(+0.50) 3.50(+0.50)

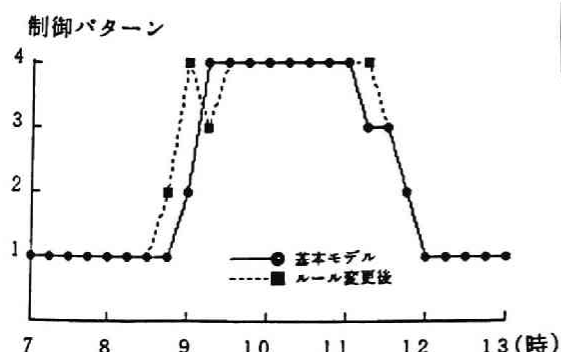


図3-37 渋滞長に関する変更後の計算結果 (4km)

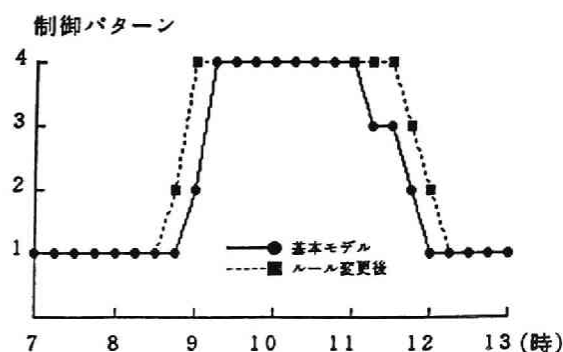


図3-38 渋滞長に関する変更後の計算結果 (3km)

これらの分析より以下のことがわかる。

- ①渋滞長に対して敏感に反応するため、「長い」の認識を変化させた場合の流入制御は基本的な制御モデルでの判断結果に比べて早期に開始される。時間的には3 km、4 kmの両ケースとも基本ケースより1断面早く8:45に制御が開始されていることがわかる。
- ②上記で示した理由から、早期の制御が行われこの結果、基本ケースでの9:05から9:30の渋滞の一部が解消されていることがわかる。この点を渋滞状況以外の要因として高速道路上の交通状態のうち渋滞量を見ると僅かではあるが（約1%）改善の方向に向かっている。これは両ケースでは大きな差が見られないが3 kmに設定したほうが、渋滞量が少なく、渋滞長に対して短い場合でもレベルの高い制御を行えば渋滞量を減少させることができるということがわかる。
- ③渋滞が玉出入路を越えた9:30から後においては、両ケースとも基本ケースと同じくパターン4の制御が続き、制御を実施した後の渋滞状況に変化は見られない。このように渋滞自身の変化には大きな影響を与えないが、制御の判断としては渋滞長が3 km程度でも高いレベルの制御が行われることになり、渋滞解消時の制御パターンの一部は両ケースとも基本ケースより強い制御となっている。
- ④平面街路への影響として総待ち時間を見ると、各入路でこの値が増加している。このことから制御内容の変更を行うことで街路に不必要な交通をもたらしていることがわかる。以上のようなことから、変数のうちそれに対する認識のレベルを変更するためにはメンバシップ関数を変更すれば良く、このことにより制御内容を変化させることができることがわかる。またその影響程度はそれほど大きくないが実際の制御効果も予期された方向に移行していることがわかる。

（2）制御継続状態に関するルールの変更

ここでは制御継続状態に関するルールを変更し、制御内容の検討を行う。基本モデルに含まれている制御継続状態に関するルールは「無制御が続けば、制御レベルは低い」であり、これは具体的には渋滞が環状線合流部から堺線方向へ発生延伸し始めた時の管制担当

〔削除ルール〕

IF LCN=on THEN LEVEL=low

〔追加ルール〕

IF CON=dec
AND CNT=long THEN LEVEL=low

図3-41 制御継続時間に関するルールの変更

者の判断の遅れを記述したものといえる。すなわち、「制御を実施していないときは、しばらく様子を見る。」といった判断を記述することになり、あまり望ましいものであるとはいいがたい。

そこで、こうした制御の判断の遅れをなくし、さらに制御継続中は制御を早期に終了するようにした場合を想定し制御内容の検討を行う。具体的には図3-41に示すようなルールの変更を行う。これは前述した無制御時のルールの削除により、制御開始を遅れさせる要因がなくなり、これに対して制御の継続が長期に渡るのを防ぐために追加したルールにより、制御終了が早くなる形のモデルとなり、全体としては予防的な制御内容が得られると考えられる。この場合削除するルール数と追加するルール数はそれぞれ1つであるため結果的には総ルール数は基本モデルと同じである。

なおこの場合の制御継続時間に対する「長い」を表現するメンバシップ関数を図3-42に示す。これは、制御を実施している時間断面数とその入力変数となるためメンバシップ関数としてはここに示すような直線的な変化をするものである。

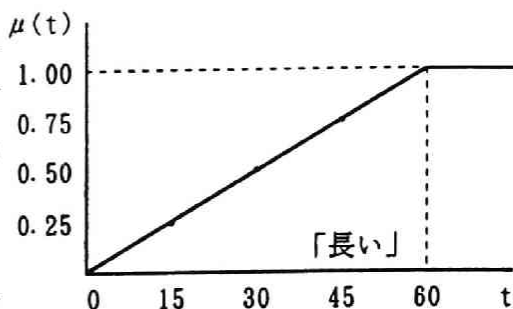


図3-42 制御継続時間のメンバシップ関数

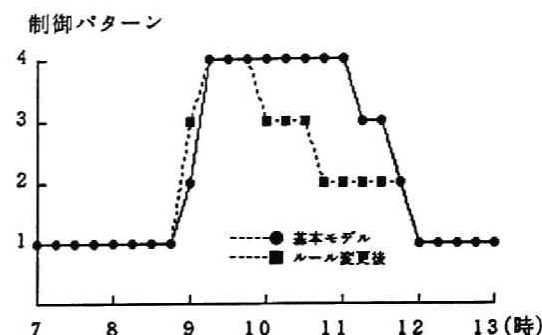


図3-43 制御継続時間に関する変更後の計算結果

表3-19 制御継続時間の変化についての評価

No	評価指標	評価値(変化)
—	①～⑦	0
⑧	制御継続時間(時) [堺] [住之江] [玉出]	1.75 (-0.75) 3.00 (0.00) 3.00 (0.00)

以上のルールの変更を行ったときのファジィ制御モデルによる判断と実際の判断結果を図3-43に示す。また制御パターン変化はルール変更時に検討したように、早期に開始され早期に終了する制御が得られている。とくに10時以降のパターンの変化においてはこの傾向は顕著である。しかし、交通状態の統計量を示す表3-19における各指標の値は変化

していない。また図3-44は渋滞状況の変化図であるがほとんど変化が見られていない。したがって図3-43での検討と同様、この制御内容変更では交通状態を変化させることは難しいことがわかる。

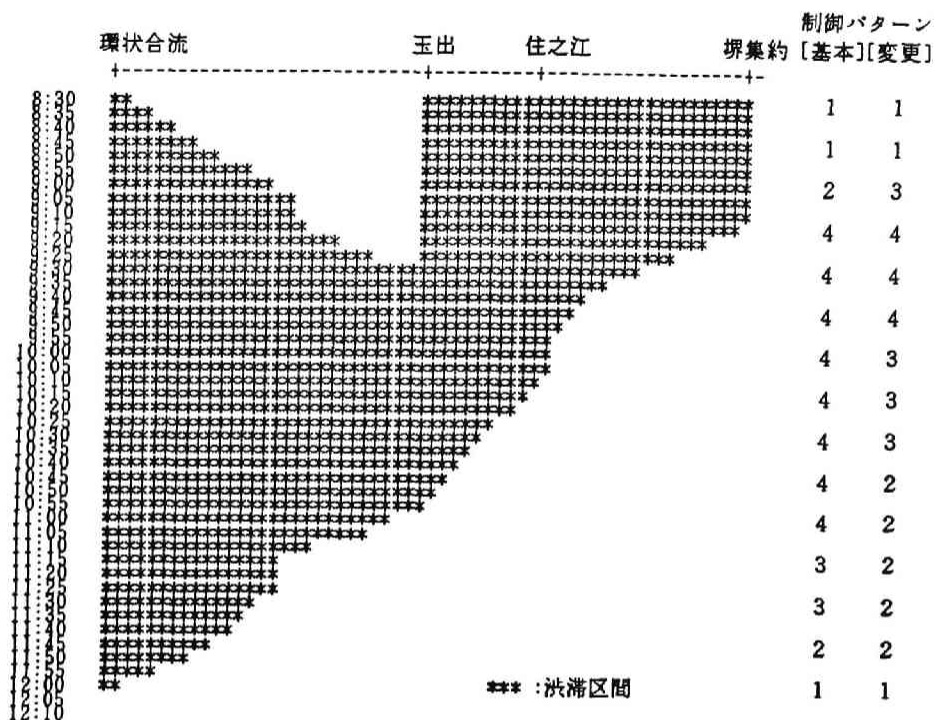


図3-44 制御継続時間に関する変更後の渋滞状況

計算結果としては、制御の内容は変化したが実質的な交通流の改善にはつながらなかったといえる。これはモデル内の挙動から考えると、結果的に流入交通量が変化していないことに起因している。すなわち交通制御の実施によってブースの開口状態を変化させても、これが流入需要量の少ない時間帯で生じている現象であり、ブース交通容量にまで達する場合が少なく、流入する量がなんらブース数の減少の影響を受けないことが原因である。特に、このことは渋滞解消時である10時から11時30分までの時間帯についていえ、制御結果は大きく変化しているが渋滞状況は変化していないことからこのようなことがいえる。

評価をおこなうためのモデル構造の問題として、渋滞シミュレーションモデルにおいては、流入需要交通量は、ブースの開口数に依存して増減することはないと考えているため、今回のような評価では当該時間帯に制御を緩和したことは、交通状態に影響を与えなかつ

たといえる。すなわちモデルの前提として、ブースの開閉が交通需要の誘発は招かないということが用いられているということである。

したがって、この前提のもとで制御の変更に対してひとつの検討結果がえられる。つまり制御の緩和を早期に行っても、特に交通状態の悪化を招く事態にはつながらなかったということであり、結論としてここで示したような早期に制御を行う新しいルール構成を考えることも可能である。とくに同一オンランプを長時間にわたって閉鎖することは特定の利用者の高速道路の利用を妨げることになることを考えれば、「早期閉鎖解除」の実用可能性を示す結果ともいえる。

しかし、注意を要することは、現実には流入需要交通量がブース開口数に依存しており開口数が多ければ需要も多いという場合が起こりうるかもしれないということである。この場合には、必ずしも上述のように影響が全くないか否かは結論しがたいが、今後渋滞シミュレーションモデルの構造を改良することで評価が可能となると思われる。

以上をまとめると次のことがいえる。まず、ルールの変更により、制御を早期に行うといった状況表現することが可能であることが示された。特に渋滞解消時の制御は低レベルのパターンが出力される形で改良がなされる。また、交通状態の評価は渋滞シミュレーションモデルの構造にもよるが、おそらく予防的な早期の制御を行うことは、都市高速道路の利用者にとっては比較的良好な交通制御結果を与えるものと考えられる。

(3) 交通制御パターンの追加

ここでは現在阪神高速道路公団で検討されている、交通管制要領改訂案に基づいて、本モデルで用いている制御パターンを1つ増やし、制御内容の検討を行う。

すでに阪神高速道路では交通管制要領という流入制御のためのマニュアルが作成されており、これを用いて実際の運用も行われている。しかし、都市高速道路のネットワークの変化や交通流動の変化に伴いこの要領の具体的見直しが行われている。これは本研究の対象とする堺線上りに関連した変更もありここではその一例として、新しい制御パターンの追加を検討する。⁸⁾

ここで追加する制御パターン（以後パターン5と呼ぶ）は、阪神高速道路公団の改訂された交通管制要領にしたがって、制御パターン4より高レベルの制御として環状線合流部からの渋滞が、西大阪線分流（3.1km地点）と玉出入路（6.1km地点）の間の区間まで延

伸した場合には玉出、住之江の両入路で30分ごとに、交互にブース閉鎖を実施するというものである。

この制御方式はこれまでのおおの最低1ブースの閉鎖を条件として考えていた玉出、住之江入路の対して、いずれかのブースは完全に閉鎖してもよいと考える場合である。したがって路線全体での開口ブース数としては1ブース減少した場合を設定していることになる。ここでは①どの程度渋滞が延伸したらパターン5を実施するか②玉出、住之江のいずれをさきに閉鎖するかを検討する必要がある。そこで本研究では、これらを踏まえてモデルの制御パターン5を以下の3つのケースで設定し検討を行う。

まず具体的なルール構成を図3-45に示す。

ここでは2段階の推論プロセスが用いられているので、これについて説明する。すなわちこれまでのモデルと同様にファジィ制御モデルを用い、制御パターンが算出される。もしこの時制御パターンが4となっていれば、さらに程度の高い制御をする可能性があるので、

[第2段階ルール]

RULE-A : IF CPN=4
AND CON=ge(L*) THEN CPN=5
RULE-B : IF CPN=4
AND CON=lt(L*) THEN CPN=CPN
RULE-C : IF CPN=not(4) THEN CPN=CPN
CPN:制御パターン, (CPN=1, 2, 3, 4, 5)
L*:制御変更基準距離 (通常L*=6.1km)

図3-45 制御パターン追加のための手順

2段階めの推論において制御パターンを変更するかどうかを検討することになる。もしここで渋滞長がとくに大きい場合には、制御パターンを5とする。

このようにして、2段階の推論でパターン5が導かれるが、実際の制御の実施にあたっては、上記で述べたようにいくつかの方法が考えられる。本研究で具体的に検討したものは以下の3種類のものである。

①渋滞長が6.1km以上のときに、玉出、住之江の順に閉鎖する。

②渋滞長が6.1km以上のときに、住之江、玉出の順に閉鎖する。

③渋滞長が5.0km以上のときに、玉出、住之江の順に閉鎖する。

(ここで、6.1kmとは玉出入路の位置、5.0kmとは界線上りの当該区間のほぼ中間の地点である。)

これらのそれぞれの比較より、パターン5の制御を導入した時の効果を調べ、モデルの判断内容を検討することにした。判断結果の推移を図3-46～図3-48に示す。また具体的な渋滞状況の変化を図3-49～図3-51に示す。また各種評価指標値は表3-20にまと

めて示す。

なお、ここでの評価においてはブース閉鎖時に高速道路の流入が不可能であることから、待ち行列が解消するという前提に基づいて計算を行った。そして本来モデルにおいては流入交通量および待ち台数として計上される交通量をブース閉鎖時の平面街路へ迂回した交通量として求めた。

これらの図表より次のことが分かる。まず渋滞状況に大きな変化が見られ「パターン5」の制御を実施することによって渋滞が大きく解消されている。このため渋滞継続時間が短くなり、また、制御パターンの変化の推移では、当然のことながらこれまでの「パターン4」にかわって部分的に「パターン5」の制御が現れている。この結果パターン5の断面以後には、基本ケースと比べ、レベルの低い制御を行っていることがわかり、各ケースとも渋滞解消に大きな効果を挙げているといえる。

とくに3つのケースの間で比較すると、③はパターン5が3断面(45分)にわたって現れるため当然ブース閉鎖時間も長い。このため、渋滞解消の効果は最も高いという結果になっている。またケース①と②では、玉出か

住之江のいずれかをさきに閉鎖することの差異が現れることになるが、実際には玉出入口のほうが流入需要交通量が多いため、ブース閉鎖の効果が大きく現れ、実数で渋滞量26.9 km時と、ケース①の方が渋滞解消の程度は高く現れている。しかし反面、平面街路への迂回した交通量も319台と①の方が多く、総合的にみると①と②に関しては制御効果の上

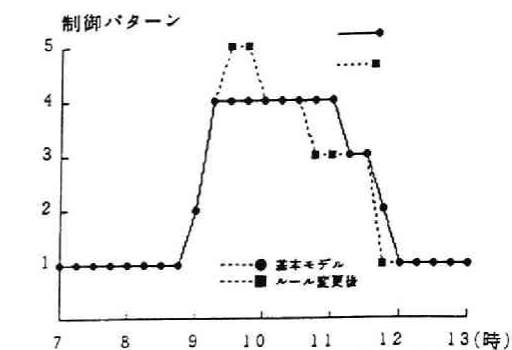


図3-46 制御パターン追加後の計算結果(ケース1)

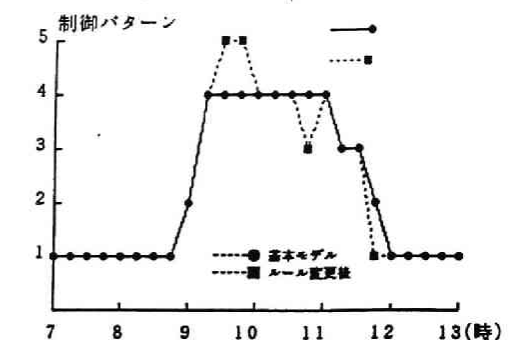


図3-47 制御パターン追加後の計算結果(ケース2)

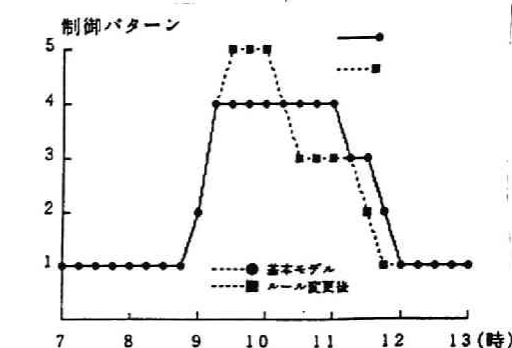


図3-48 制御パターン追加後の計算結果(ケース3)

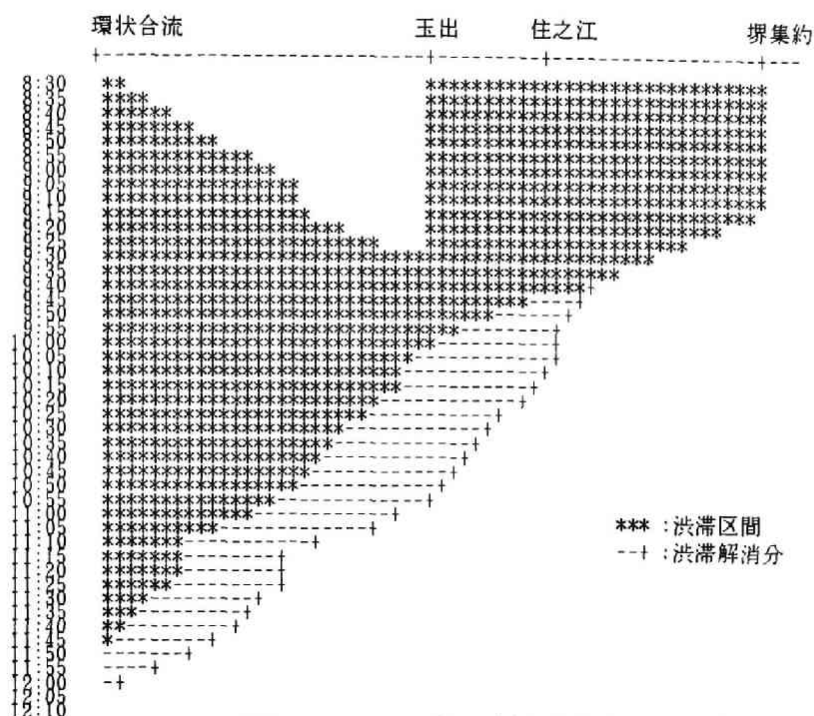


図 3-49 制御パターン追加後の交通状況 (ケース 1)

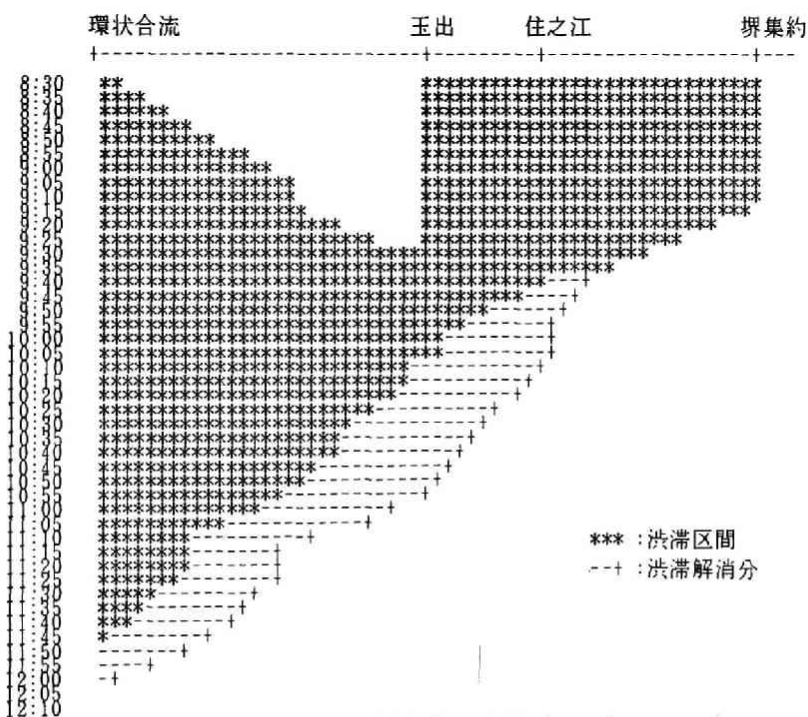


図 3-50 制御パターン追加後の交通状況 (ケース 2)

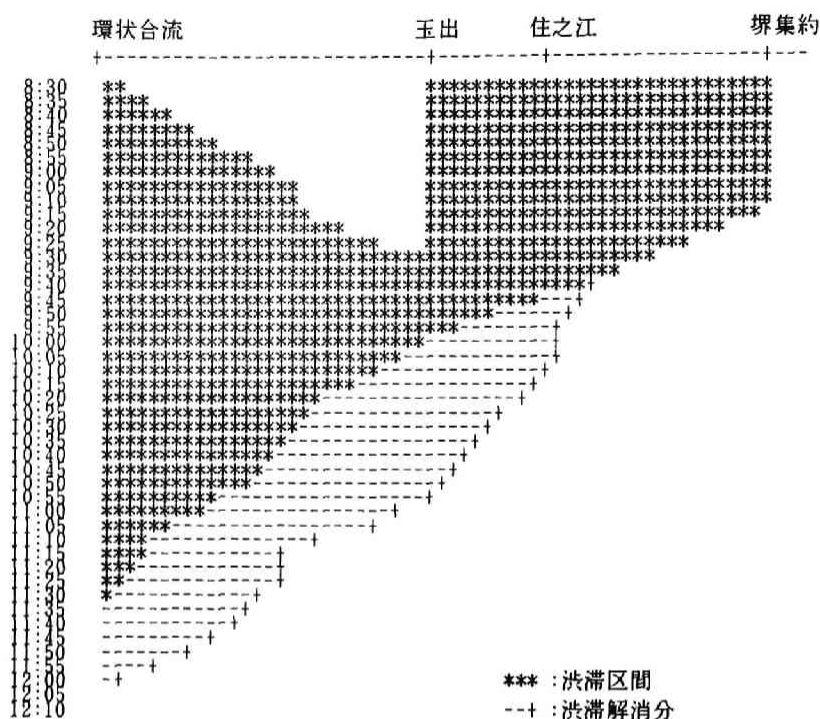


図 3-51 制御パターン追加後の交通状況（ケース 3）

表 3-20 制御パターン追加に対する評価

No	評価指標	ケース 1	ケース 2	ケース 3
①	流入交通量 [住之江] (台) [玉出]	0 -318	-291 0	-121 -318
④	総渋滞量 (km)	-4.4	-4.1	-5.7
⑤	総旅行時間 (台・時)	-689.0	-631.5	-857.4
⑥	総走行台キロ (台・km)	-1942.7	-2383.8	-2933.3
⑧	制御継続 [堺] 時間 (時) [住之江] [玉出]	0 -0.25 -0.25	0 -0.25 -0.25	-0.25 -0.25 -0.25

では大きな差異は存在しないといえる。

これらをまとめると、これまでよりレベルの高いブース閉鎖の制御を導入することにより、渋滞状況に大きな改善が得られることがわかった。また玉出、住之江の各入路の閉鎖の順序に際しては、渋滞解消の効果ではほとんど差異が見られず、特に実際の運用にあたっては平面街路に与える影響が大きく異なるため、この状況に応じて閉鎖順序を決定すれば良いと思われる。このためパターン5の制御をモデルに組み込む際には平面街路の状況を入力できるようにする必要がある。

(4) ファジィ流入制御モデルの改良についての整理

本項ではファジィ流入制御モデルに評価のための渋滞シミュレーションモデルを結合し、ファジィ制御モデルの目的のひとつである制御内容の評価検討を行った。以下特にモデルによるルールの変更とその評価について中心に述べる。

- ①本研究ではモデルの改良として、(a) 渋滞長についての認識の差異、(b) 渋滞に対する早期の制御解除、(c) 高いレベルの流入制御の設定の3項目について検討した。この結果いずれの場合もルール変更時に予想される制御結果および制御効果の方向性と計算結果は一致し、渋滞シミュレーションを併用することによってモデルの改良後の制御効果が算出できるシステムが構築されたといえる。
- ②具体的なルールの持つ影響に対しての検討結果から(a)の場合には堺線のみを対象にした際には大きなモデル改良とはならず、とくに制御ルール変更を行う必要性は乏しい。また(b)の渋滞解消時の早期閉鎖解除は利用者の閉鎖に対する忌避感からも検討が望まれることからここで評価をおこなったが、今回の計算結果から早期制御解除はとくに渋滞状況は悪化させることは考えられないことから、このルール群の採用も可能であると考えられる。(c)の場合は現在提案されている方式であり、これらの中では最も渋滞状況を変化させることのできる制御ルール群であるといえる。したがって、現実的な実施の方法の検討などを考慮しモデルへの導入が望まれるものである。
- ③モデルの評価結果については、②で示したような結果となった。しかしこの評価方法は計算結果が渋滞シミュレーションモデルに依存しているため必ずしも全て妥当な結果であるとはいいがたい。したがって、実用的レベルを考えれば、評価用の渋滞シミュレーションモデルの改良を含めて、さらに現実の交通状況を正確に認知できるシステムとす

る必要があるとともに、ファジィ制御でのモデル改良の最も注目すべき方法とされているヒューマンインターフェイスの導入を検討すべきである。すなわちこれは制御の検討に際しても人間の認識を加えて行く必要があるということである。

3-5 結 語

本章においては、まず3-2において交通制御の現状とファジィ性について検討した。3-3ではファジィ流入制御モデルの作成と検討を行った。また3-3では、基本的なファジィ流入制御モデルの構築を行った。この結果モデルにおけるいくつかの一般的性質を知ることができた。また3-4ではファジィ流入制御モデルの実用的な改良という点から検討をおこなった。ここでは、渋滞状況のシミュレーションをすることによって交通制御の効果をみていこうとするものである。そして最終的には交通制御ルールの変更による制御効果の改善をねらっている。

こうしたファジィ制御の方法の交通工学への適用ということは、今後一層考えていく必要があると考えられる。ここでは、2つの課題をのべる。

- ①交通制御効果をみるために渋滞シミュレーションモデルを用いたが、現在のファジィ流入制御モデルでは、評価結果がつぎの期の制御内容に変化を与えることはないと考えられる。したがって、現象の評価を含んだモデルを構築することが重要である。
- ②こうした交通制御問題は、このファジィ制御の方法ですべてが解決するものではない。とくに複数の高速道路の路線が同時に制御される場合には応用が難しい（これについては第4章で検討する）。また交通工学的にはファジィ制御の適用範囲を検討する必要があるだろう。

[第3章 参考文献]

- 1) 阪神高速道路公団：阪神高速道路のしごと，1987.
- 2) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.
- 3) C.P.Pappis and E.H.Mamdani, A fuzzy logic controller for a traffic junction, IEEE Trans SMC-7-10, pp.707-712, 1977.
- 4) 安信誠二・宮本捷二・井原廣一：予見Fuzzy制御方式による列車自動運転，システム

と制御, vol.28, No.10, pp.605-613, 1984.

- 5) 稲葉則夫 実用化が始まったファジィ理論●2 日本では電車の自動運転、浄水場の制御などに利用 日経エレクトロニクス '84.12月号, pp.183-192, 1984.
- 6) 阪神高速道路公団: 交通管制における収集情報の総合化と効率化に関する検討業務報告書 1985, 1986.
- 7) 阪神高速道路公団・(財)高速道路調査会: 阪神高速道路の交通管制に関する研究報告書、1983.
- 8) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村透: 都市高速道路交通管制の効率化に関する検討, 土木計画学研究発表会講演集, vol.8, pp.129-135, 1986.
- 9) 水本雅晴: ファジィ理論とその応用, サイエンス社, 1988.
- 10) 菅野道夫: あいまい集合と論理の制御への応用, 計測と制御, vol.18, No.2, pp.8-17, 1979.
- 11) 山崎東・菅野道夫: ファジィ制御, システムと制御, vol.28, No.7, pp.442-446, 1984.
- 12) 秋山孝正・奥村透: ファジィ制御手法による高速道路交通制御のモデル化, 第29回システムと制御研究発表講演会講演論文集, pp.215-216, 1985.
- 13) 佐佐木綱・秋山孝正・奥村透: 交通管制の効率化をめざした流入制御記述モデル、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 4, pp.463-464, 1985.
- 14) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama: Development of Fuzzy Traffic Control System on Urban Expressway, Control in Transportation Systems(1986), Proc. of the Fifth IFAC/IFIP/IFORS International Conference, pp.215-220, 1987.
- 15) 秋山孝正・佐佐木綱・奥村透・広川誠一: ファジィ流入制御モデルの作成と検討, 土木計画学研究・論文集, No.4, pp.93-100, 1986.
- 16) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama: Traffic Control Process of Expressway by Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems, Vol.26, No.2, pp.165-178, 1988.
- 17) 佐佐木綱・秋山孝正・奥村透・広川誠一: 高速道路におけるファジィ交通制御モデルについて, 第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 1986, 6.
- 18) Tsuna Sasaki and Takamasa Akiyama: Fuzzy On-ramp Control Model on Urban Expressway and Its Extension, Proc. of the Tenth International Symposium on

Transportation and Traffic Theory, pp.377-396, 1987.

- 19) Takamasa Akiyama and Tsuna Sasaki: Extended Fuzzy Traffic Control on Urban Expressway, Preprints of Second IFSA Congress, pp.278-282, 1987.

第4章

交通制御エキスパートシステムについての研究

4-1 概 説	109
4-2 エキスパートシステムの概要	111
4-2-1 知識工学について	111
4-2-2 プロダクションシステム	111
4-3 交通制御エキスパートシステムの作成	113
4-3-1 交通制御手順の検討	113
4-3-2 エキスパートシステムの作成	115
4-3-3 システムの挙動	117
4-3-4 基本システムについての検討	119
4-3-5 基本システムに関するまとめ	121
4-4 交通制御エキスパートシステムの実用的改良	122
4-4-1 実用的エキスパートシステムの提案	122
4-4-2 交通制御エキスパートシステムの全体構成	124
4-4-3 交通制御ルールに関する改良	126
4-4-4 入出力に関する実用的改良	130
4-4-5 確信度の導入に関する改良	131
4-5 実用的なシステム改良とその結果	135
4-5-1 改良型エキスパートシステムの実用性	135
4-5-2 交通制御ルールの実用的変更	143
4-5-3 ファジィ性導入に関する検討	145
4-6 結 語	147

第4章 交通制御エキスパートシステムについての研究

4-1 概 説

第3章で述べたように、都市高速道路の快適性と円滑性を保つための交通管制は日常的に行われている。この交通管制の現状を考えて交通制御意志決定時の情報の収集と効率的運用について検討することを目的として研究が行われた。これまでに交通管制の効率的運用を目指して交通制御内容を記述する試みが、いくつかなされてきた。すでに前章で提案されたファジィ推論による交通制御方法はその一つであり、制御内容記述のひとつの方法論を示している¹⁾。この研究の問題点の一つとして、複数路線対象の一般的なモデルの作成の必要性が挙げられており、その解決には、多くのルールを系統的に処理できる方法の検討が必要であるとされた。本章ではこの点を特に重視し、また実際の交通制御の判断プロセスを生かした方法を求めるため、近年多くの研究が行われている知識工学手法の応用についての検討を行う。

第2章においてのべたように、一般に知識工学の具体的方法として、エキスパートシステムがあるが、これにより交通制御時におこなっている判断を計算機に代替的に行わせ、知識ベースとして、これを保存しておくことで、さらに有効な交通制御ルールを構築することができる。

人工知能（AI）に関する各種研究が行われ、計算機技術のひとつの発展体系として一般にも認識されるようになってきている。この考え方は、計算機を用いた情報処理工学の分野においては、古くから多くの研究がなされており、特に応用人工知能であるエキスパートシステムについては、実用的検討が重要視され、各種の実用的システムが構築され現在では、貴重な情報処理手段のひとつとなっている。

さらに、エキスパートシステム開発用のツール（エキスパートシェルと呼ばれる）等も一般に利用可能となり各種企業を中心として実用化が急速に進んでいる。こうした動向については、第2章で述べたところである。

都市高速道路の管理運用においても収集された情報の効率的な処理は重要である。エキ

エキスパートシステムは、本来専門家の経験的知識にもとづいて行われる各種の問題解決を行うためのものであるから、こうした交通情報の処理においても適用が可能であろうと考えられる。

また、現実にも都市高速道路の交通制御においても、LP制御などの論理的方法に加えて、発見的な方法を用いた制御方式として、交通制御要領を設定しオンランプ制御パターンによる実用的制御が実施され有効な制御結果を提示している。

この意味で、本研究はひとつの交通制御に対する経験的結論をエキスパートシステムにおける保存された知識として用いようとする試みであるといえる。

またこれは、多様化する交通工学上の各種問題に対するエキスパートシステム適用性の検証のひとつとも考えられる。従来、論理的・計量的構造を有するモデルの優位性が主張されてきたが、今や真に人間のための土木計画を目指すべき時代に至っており、その意味で発見的・経験的な方法に期すべきところは大きいと考えられ、その一解決法としてエキスパートシステムの適用を提案することは重要かつ必要なことである。現在なお、エキスパートシステムについての土木計画における理解は希薄である。確かにエキスパートシステムは、一般にはLISPなどの記号処理言語を用いた情報処理用のプログラムである。したがって、エキスパートシステムを用いたことが、各種問題の解決法を改善するとはいえない。しかし、逆にこれがエキスパートシステムの必要性の否定にはならない、各種知識を保存し、これを改善することや、実用的に用いることを考えればその有用性は見いだせるであろう。

本研究では、LISP言語を用いた基本的構造を持つエキスパートシステムを構築し、実用上重要となる諸点を検討するものである。まず交通制御エキスパートシステムとしてすでに開発されたものについて、その機能の検討を行うとともに問題点と実用的に改良すべき諸点の整理を行う。つぎに、パーソナルコンピュータ上のエキスパートシステムとして具体的に改良を行うための各種の検討を行う。これによって、これまでの交通制御の方法が整理されるとともに、実用性の向上を行うことができる。

さらに上記のようにして検討された結果から、改良されたエキスパートシステムが得られるが、実際への適用性および確信度の表現方法について検討することによって、さらにその有用性が増加するものであると考えられる。最終的にこれらの成果をまとめ本章の結論とする。

4-2 エキスパートシステムの概要

4-2-1 知識工学について

知的な判断を計算機に委ねようとする動きは各分野からの要請でもあり、近年、特に知識工学的な方法論の研究およびその応用について研究が進んでいる。知識工学は知識を利用して知的問題解決を実現するための工学で、応用人工知能とも呼ばれる。知識の表現、知識の利用、知識の獲得が主なテーマとなっている。^{2),3)} 知識工学(KE: Knowledge Engineering)という言葉は正確には米国、スタンフォード大学のファイゲンバウム教授が1977年MITの人工知能会議において提案したものを端緒とする。

またエキスパートシステムは知識工学における具体的な産物であり、各種の定義ができるが、ふつう「特定の問題領域のエキスパートの専門知識を利用して複雑な問題に関してエキスパートと同等の問題解決能力をもつようにした知的プログラム」とされる。すなわち実際には、診断、監視、制御、設計などの問題解決のために作成されたコンピュータ用の知的プログラムであるといえる。⁴⁾

なかでも中心的なものは特定分野の専門家の知識をベースとして、多数のルール群を構成することによって人間的な判断を行わせようとする、ルールベース(知識ベース)システムとしてのエキスパートシステム作成は著名な方法の一つである。⁵⁾ こうした研究は、これまで専門家に委ねられていた判断を計算機に任すことで、利用範囲の大きい汎用的な判断システム作成を目指したものである。

このような知識工学的な考え方は、交通制御の分野においても実際問題への適用が可能であり、特に各種情報の効率的处理といった立場から、益々重要視されるものと思われ、詳細な研究が望まれる。

4-2-2 プロダクションシステム

エキスパートシステム構築の方法には、プロダクションシステム、ブラックボードモデル、フレームモデルなど、いくつかの代表的なものがある。なかでもプロダクションシステムは、近年多くの研究がなされている知識

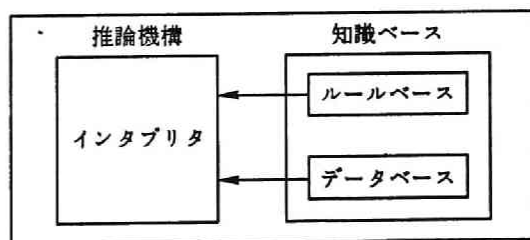


図4-1 プロダクションシステムの基本構成

工学の一方法であり、各方面で用いられているものである。

最も基本的なプロダクションシステムの構成は、図4-1に示すようである。本図からもわかるようにプロダクションシステムは、

- (1) ルールベース
- (2) データベース (ワーキングメモリ)
- (3) インタプリタ (推論機構)

から構成されるのが一般的である。^{3),4)}そして、ルールベースとデータベースを併せて「知識ベース」と考えることができる。

一般に、ルールベースは、ルール形式で記述された知識を格納する知識ベースであり、(IF 条件 THEN 結論/行動)の形をしたプロダクションルールの集合からなる。このプロダクションルールは、具体的には、次のように書くことができる

IF 条件 1 & 条件 2 & … & 条件 n |
THEN 結論 1, 結論 2, …, 結論 m | (4-1)

ここで、IF 以下の条件部の条件 1, 条件 2, …, 条件 n のすべてがデータベース (作業記憶) 中のデータと一致すれば、THEN 以下に示された結論部 (あるいは動作部) の結論 1, 結論 2, …, 結論 m を順次実行するものである。⁶⁾この推論のプロセスは図4-2に示されている。

データベースは事実の集合からなり、プロダクションシステムの状態を保持する記憶領域であり、判断の材料、判断結果、中間的情報などを保存する領域である。したがって、ルールの基本的働きは、データベース内の事実に対して、ルールの条件部を満たしていれば、結論部の動作を実行することである。

インタプリタはルールを適用して推論を行うためのプログラムである。したがって、ルールの選択、適用、ゴールの生成などを行い、プロダクションシステム全体の挙動を制御するものであるといえる。

このような、プロダクション規則を持つ推論システムは、以下のような特徴があるとされている。

- ・ルール群を構成し知識の変更、追加が容易である。

ルールベース

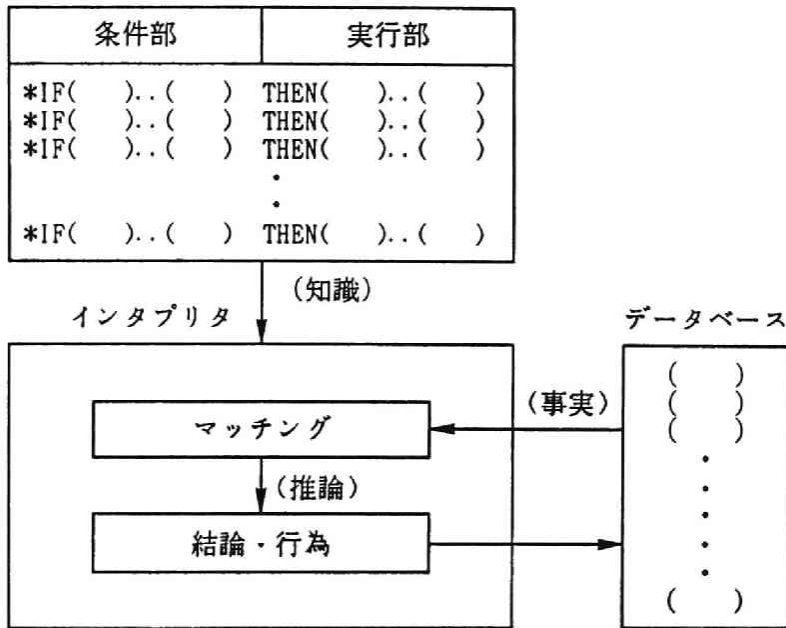


図4-2 プロダクションシステム推論サイクル

- ・システム内の知識を容易に知ることができる。
- ・「IF THEN」形式であるから、個々のルールにおける論理関係が明確である。
- ・ルール数の増加が処理速度の増大をもたらす。
- ・一連の手続きを直接的に表現することができない。
- ・人間の知識構造が「IF THEN」形式ですべて表現できるとはいえない。

以上のように、長所と短所が存在するが、一般に小規模なシステムであれば、長所が活かされ有効であるとされている。⁴⁾

以下では、こうしたエキスパートシステムの特徴を生かし、その具体的なエキスパートシステムの作成を交通制御への応用を考慮して検討する。

4-3 交通制御エキスパートシステムの作成

4-3-1 交通制御手順の検討

都市高速道路の交通制御のひとつの例として、阪神高速道路における交通制御を取り上げる。ここでは、特に複数路線を対象とした実際に用いられている交通管制パターンを記

述することを検討する。これは、第3章においてすでに検討された「交通管制パターン」を用いる制御である。すなわち、表4-1（前述図3-2と同じ）に示すように交通管制が渋滞長の変化を考慮し「渋滞延伸に対するオンランプにおける流入制御」で対応するため、各制御対象オンランプの開口状態を判断するものである¹⁾。

これらは、実際には現場における交通管制上の各種制約、管制実績等から効率的な交通管制が実施可能となるように検討され作成されたものであることはすでに述べたとおりである。

具体的には、表4-1と図4-3を一对として用いて判断を実施する。つまり、図4-3の各区間の渋滞状況を入力としてこの時の各関連オンランプの必要開口数を表4-1より抽出するものとなっている。たとえば、渋滞区間が①～③に該当する区間であれば、本表中の③の列に示されるブース数にすることを意味する。

このときの「交通制御判断手順」は以下のものであると考えることができる。

表4-1 交通管制パターン表の例

路 線	入 路	通常 開口 ブース数	管制パターン				
			①	②	③	④	⑤
環 状 線	堂 島	2					
	高麗橋	2					
	長 堀	1					
	夕陽ヶ丘	1					
	えびす町	2		1	1	1	1
	湊 町	2		1	1	1	1
	四ッ橋	2		1	1	1	1
	信濃橋	2					
守 口 線 上	高 津	2		1	1	1	1
	守口集約	5					3
	森小路	2					1
	都 島	1					
松 原 線 上	長 柄	1					
	松原集約	5		4	4	3	4
	喜連瓜破	2		1	1	1	1
	駒 川	2		1	1	1	1
堺 線 上	阿倍野	2		1	1	1	1
	堺集約	5		3	3	4	4
	住之江	2		1	A0	1	1
玉 出	玉 出	2		1	B0	1	1

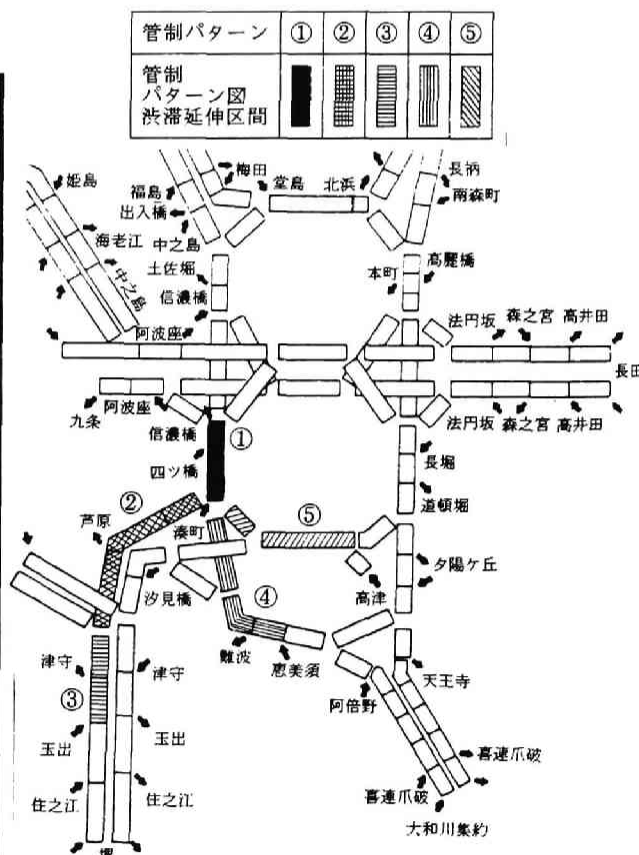


図4-3 交通管制パターンの例

- ①高速道路全線に対して、渋滞状況のデータが入手される。実際には各区間の渋滞という形をとる。
- ②管制パターン図の渋滞区間に対応して、制御すべきオンランプとそれぞれの開口ブース数が管制パターン表より知られる（表4-1）。
- ③以上の結果、一般に複数の管制パターンが必要となるが、この場合これらのパターンの組合せとして、最終的に各オンランプの開口ブース数を決定する。

このように、本例のような阪神高速道路の交通管制パターンに対して、上記の手順で判断が行われる。したがって、実際の交通管制パターンは、代表的な渋滞先頭区間と、その延伸の方向によって大別され、本例と同型式の図表が10数枚で構成されている。このため、現状の判断では、これらの複数の管制パターンが一体的に運用され、それぞれに独立した判断内容を持つことになっている。

本研究では、すべてのパターンを基本モデルとして、取り上げることは煩雑であり、また実用的モデルの検討の初期段階とするために図4-3に対応する、判断をエキスパートシステムとしてモデル化することにした。

4-3-2 エキスパートシステムの作成

（1）インタプリタの作成

すでに述べたように、プロダクション型のエキスパートシステムでは、インタプリタがシステム全体の挙動、とくに推論過程を決定するため重要である。本研究では、推論インタプリタとして、最も基本的なパターンマッチングの方法を用いて作成した。その特徴について、以下に簡単にまとめる。

- ①推論は前向き推論を実行する。したがってデータ・ベースの条件部を持つルールを選び、その結論部をデータ・ベースに対して実行する。これを繰り返して結論にいたるものである。
- ②ルールの競合の処理は、ファーストマッチの方法をとるものとする。したがって、あるデータに対して、複数のルールがマッチングした場合には最初に適合したものとする。（すなわちルール群の上位に記されているものが採用される。）
- ③知識の曖昧さあるいは信頼度を表す確信度（certainty factor）は基本システムでは用いないものとする。

このプログラミングにおいては、記号処理、集合演算などに有効なコンピュータ言語LISPのひとつであるUTILISPによって作成した。本研究で用いたUTILISPは、京都大学大型計算機センターで運用され、端末機上からの操作が可能なるものである。またこのインタプリタは、構造工学の分野でも用いられているものを基本として⁸⁾、作成している。

(2) 入出力の説明

実際のプログラムの一部を図4-4に示す。これは、ルールベース部に含まれる、LISP表現を持つものであるが、各ルールが「IF THEN」型に表現されていることがわかる。また実際の入出力もこの例からわかる。このルール中で用いられる変数は区間を示す、LINK-1（四ッ橋—湊町）からLINK-5（環状合流—千日前）と、制御のパターンを示す、PATTERN-1からPATTERN-5である。またこれらに対して、その状態を示す変数は、JAM（渋滞中である）とADOPTED（あるパターンが採用されている）が用いられている。またルールベース中の各作業である、DEPOSIT（データの登録）、DELETE（データの削除）などの命令は、インタプリタ上で定義されているものである。

(3) プログラムの説明

システムの内部ではインタプリタによって定義されている関数を用いてパターンマッチングおよび判断をおこなう。たとえば、データベースに
(LINK-1 JAM) & (LINK-2 JAM)、つまり
{リンクー1が渋滞中でかつリンクー2が渋滞中}

という交通状況が与えられたとする。

この場合には、図4-4でまずRULE1-1がマッチングし、この結果(PATTERN-1 ADOPTED)がデータベースに加えられる。さらにこの結論と(LINK-2 JAM)からRULE1-2がマッチングし、(PATTERN-2 ADOPTED)が得られることから制御パター

```
(RULE1-1
  IF
    (LINK-1 JAM)
  THEN
    (*WRITE PATTERN1-IS-ADOPTED)
    (*TERPRI)
    (*DEPOSIT ('(PATTERN-1 ADOPTED)))
    (*DELETE ('(LINK-1 JAM)))
)
(RULE1-2
  IF
    (PATTERN-1 ADOPTED)
    (LINK-2 JAM)
  THEN
    (*DEPOSIT ('(PATTERN-2 ADOPTED)))
    (*DELETE ('(LINK-2 JAM)))
    (*WRITE PATTERN2-IS-ADOPTED)
    (*TERPRI)
)
(RULE1-02
  IF
    (PATTERN-2 ADOPTED)
  THEN
    (*TERPRI)
    (*WRITE EBISUCHO----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE MINATOMACHI---->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE YOTUBASI----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE KOZU----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE MATUBARA----->4-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE KIREURIWARI---->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE ABENO----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE KOMAGAWA----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE SAKAI----->3-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE SUMINOE----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*WRITE TAMADE----->1-BOOTH)(*TERPRI)
    (*STOP)
```

図4-4 LISPプログラムの例

ンは2となる。さらにRULE1-02より制御パターン2を採用した場合に制御すべき各オンラインの開口状態が書き出されるわけである。したがって、この例の場合には3段階の推論によって最終的な結論が得られたことになる。^{8),9)}

この例でもわかるように、ルールの記述そのものがLISPという記号処理型の言語を用いることで、容易な形で表現されており、これがFORTRANなどの手続き言語を用いた場合と比較した上での長所であるといえる。

4-3-3 システムの挙動

ここで、作成された基本システムでは、直接LISPプログラミング言語を用いて、交通状態を入力することでシステムを稼働させることが、可能となっている。具体的には、まず、インタプリタと必要なルールベースをロードし、これに対して、判断の材料となるデータベースを与える。

具体的には、データベースには、その時点での高速道路の交通状態等を与えられる。実際の命令は、(DATABASE '(入力情報))の形式によって行われる。つぎに(START)命令を与えることによって推論が実行される。この結果最終結論が得られ、出力されるとプログラムはSTOPするように制御されている。本研究では、実際にシステムを実行させた場合にどのような結論が出力されるかを計算例として示す。

(計算例1)

「リンクー1が渋滞中、リンクー5で渋滞が発生」

この時は、入力情報が渋滞区間に関するもののみの場合である。この時には管制パターン表を参照してもわかるように、リンクー1すなわち四ッ橋付近から渋滞が延伸し、さらに渡り線(リンクー5)の方向に渋滞が延伸している場合である。この場合は、表4-1の管制パターン表から知られるように、管制パターン5が採用されることになる。この制御パターンは環状線への影響を予防的に減少

```

>_(DATABASE '(((LINK-1 JAM)(LINK-5 JAM)))
((LINK-1 JAM) (LINK-5 JAM))
>_(START)

PATTERN1-IS-ADOPTED
PATTERN5-IS-ADOPTED

EBISUCHO----->1-BOOTH
MINATOMACHI---->1-BOOTH
YOTUBASI----->1-BOOTH
KOZU----->1-BOOTH
MORIGUTI----->3-BOOTH
MORISHOJI----->1-BOOTH
MATUBARA----->4-BOOTH
KIREURIWARI---->1-BOOTH
KOMAGAWA----->1-BOOTH
ABENO----->1-BOOTH
SAKAI----->4-BOOTH
SUMINOE----->1-BOOTH
TAMADE----->1-BOOTH
***STOP***NIL

```

図4-5 出力例(その1)

させるために、特に守口線方面のランプ閉鎖が実施される場合である。したがってシステムからの出力としてはパターン5の具体的なブース閉鎖の状態が出力されている（図4-5参照）。

この例では最終的に、環状線4箇所、守口線2箇所、松原線4箇所、堺線3箇所、合計13箇所のブース制限を示していることがわかる。

（計算例2）

「すでにパターン-2が採用されておりリンク-3が渋滞が発生」

この時は、リンク-1に関する情報はなく、四ッ橋先頭の渋滞であるかどうかすぐには判断できない場合である。しかし、すでに何等かの制御が実施されており、これが「管制パターン-2」に対応する場合である。システムに判断にもとめるデータは、これに加えてリンク-3が渋滞した場合である。

これを、リンクに関する情報として捉えるならば、結果的には四ッ橋から堺線上りの本線上に属するリンク-1からリンク-3まで

```
>_(DATABASE '((PATTERN-2 ADOPTED)(LINK-3 JAM)))
((PATTERN-2 ADOPTED) (LINK-3 JAM))
>_(START)

PATTERN3-IS-ADOPTED

EBISUCHO----->1-BOOTH
MINATOMACHI---->1-BOOTH
YOTUBASI----->1-BOOTH
KOZU----->1-BOOTH
MATUBARA----->4-BOOTH
KIREURIWARI---->1-BOOTH
KOMAGAWA----->1-BOOTH
ABENO----->1-BOOTH
SAKAI----->3-BOOTH
SUMINOE----->1-BOOTH:0-BOOTH
TAMADE----->0-BOOTH:1-BOOTH
***STOP***NIL
```

図4-6 出力例（その2）

の全区間が渋滞した場合に等しい。したがって、表4-1からもわかるように、「制御パターン-3」が採用され、これに対する具体的なブース閉鎖の状態が出力されている（図4-6参照）。

この例では、堺線のオンランプに対し、1-Booth:0-Boothあるいは、0-Booth:1-Boothの表示がなされているが、これは実際の制御においては、住之江オンランプと堺のオンランプを約30分ごとに交互にいずれかを閉鎖することをあらわしたものである。この制御方法は「管制パターン-3を採用する場合には管制パターン-2にくらべてさらに流入を抑制する。したがって堺線上でランプ閉鎖を実施する。」また「特定オンランプを長時間にわたって閉鎖しない。」という判断ルールを考えるための知識、いわゆるメタ知識にもとづいてたものであるといえる。

以上に示したそれぞれの（計算例）からわかるように、本研究でのプロダクションシス

テムは入力情報として、①各リンクの渋滞・非渋滞の情報、②これまでの制御状態とあらたな渋滞区間についての情報の2種類の入力が可能であり、最終的には各オンランプの開閉ブース数が提案される。上記以外の数ケースについても、同様の出力状態の確認を行ったが、いずれも妥当な判断結果を与えることが確認され、基本システムが作成された。

4-3-4 基本システムについての検討

ここでは、さきに作成されたエキスパートシステム改良のための基本的検討として、大別して①判断ルールの改良、②システムとしての改良をおこなった。これらについての具体的な検討結果を以下に示す。

(1) 判断ルールの改良

前章までで、渋滞情報、過去の制御状態などをもとに、複数関連路線についてブース閉鎖・制限による流入制御を判断できるモデルが構築された。したがって、同様な方法でさらに記述を拡張することが可能である¹⁰⁾。

表4-2 ルール群の比較

エキスパートシステムでは、前述したように、基本的なシステム構成を変更することなく、ルールベースの改良によって新たな判断を実行可能なものとすることができる。そこで本研究では、新たなルール群を検討した。旧ルール群と比較して表4-2に示す形とした。すなわち、実際の対象とできる渋滞区間の組合せが増加したことが基本的な改良である。

ルール	旧ルール群	新ルール群
ルール数	18	29
入力情報	・渋滞状況 (四ッ橋先頭) ・制御状況	・渋滞状況 (各関連区間) ・制御状況
出力情報	・開閉ブース数 (各パターン)	・開閉ブース数 (関連ランプ)

具体的には、従前のルールでは、つねに四ッ橋先頭の区間(リンク-1)の渋滞に対応して制御する場合を想定しており、たとえば、他区間リンク-2とリンク-3のみの渋滞といった場合には、該当するルールが存在しない。したがって、システムからは、No-production(該当ルールなし)の判断が出力される。しかし、現実には先頭区間リンク-1が渋滞を生じていなくても、渋滞当該区間下流のオンランプでは、オンランプの制御を行う必要がある。そこで、この場合の判断も可能なものとした。

したがって、知識ベースとして「表4-1
の管制パターン表のうち、渋滞区間より上流
に存在するオンランプの制御のみを実施する。」

という、実用上の知識が追加されたものと
考えることができる。

```
>_(DATABASE '((LINK-2 JAM)(LINK-3 JAM)))  
(LINK-2 JAM) (LINK-3 JAM)  
>_(START)  
SAKAI----->3-BOOTH  
SUMINOE----->1-BOOTH  
TAMADE----->1-BOOTH  
***STOP***NIL
```

図4-7 出力例(その3)

この新ルール群における出力例を以下に示す(図4-7参照)。

この例は、さきにものべたように、リンク1は渋滞せず、リンク2とリンク3のみ渋滞が発生している場合である。これらは、いずれも堺線上に属するリンクであり、この場合、環状線への影響は考慮されない。したがって、制御パターン3のうち堺線上に存在する、堺集約、住之江、玉出の3箇所のランプ制御のみが出力されている。

以上のように、プロダクションシステムとして記述することによって、ルールの変更が比較的容易に行え、新たな制御行動の判断を追加的に保存することが可能であることがわかった。

(2) システムとしての改良

前節で述べたエキスパートシステムは、プログラム言語としてUTILISPを用い、大型計算機センタにおける専用端末として稼働するものであった。したがって、この環境下のみで、システムが稼働するため、汎用性に乏しいものとなっていた。そこで、

- ①実際のエキスパートシステム使用に当たって、編集作業やシステムの操作が容易であること。
- ②巨大な記憶容量を必要とする大型専用計算機に対して、一般OA機器として用いられる程度の計算機上で稼働可能なものとする。

といった点から、一般のパーソナルコンピュータ上で同様の計算を行うための検討を行った。

具体的には、使用言語として、前システムと同じくLISPのうち、パーソナルコンピュータ用に開発されたGCLISP (Golden Common LISP) を用いた¹¹⁾。従来LISPには、標準言語がなく移植性に乏しいとされたが、本研究で用いたCommon LISPは、これまでのLISPを統合的に取り扱っているため、計算機上の命令等に若干の相違は存在するが、基本的には従前のプログラムをほぼ変更なしに用いることが可能であった。

実際には、パーソナルコンピュータNEC-PC9801 VX2上のシステムとして開発されている。本図からもわかるように、本機器と同等以上の演算機能を持つ計算機であれば、前述のシステムと同様に実用可能である。

具体的には、インタプリタと前節でのべた改良されたルールベースを基本プログラムとして保存し、同様な命令群で推論を実行する形となった。

これは、小型化されたシステムであり大型機に比べて、演算時間等の点で若干の問題点はあるが、この点も現在のルール数程度の推論の場合実用的には、全く同様の判断が可能であることがわかった。

また、パーソナルコンピュータの長所である操作の容易性から、ルールの変更、プログラム作成など、いわゆるデータ編集の利便性が向上している。

4-3-5 基本システムに関するまとめ

本研究では、都市高速道路での交通制御に対して、知識工学的な方法を用いることを検討した。ここでは、とくに実際の交通制御を考えるために、阪神高速道路で行われている複数路線の交通制御の記述のための方法を検討するために、プロダクションシステムを用いた交通制御記述方法について検討した。ここでは、知識工学の基本的考え方とその具体的な例を示した。とくに、一般のプロダクションシステムの基本形式に忠実にシステム構築をおこない、ユーザーインタフェース等は不十分であるが、原理的な面で参考となるものが作成された。

特に実際に行われている交通管制パターン表をプロダクションシステムとしてモデル化することでその実際のモデル挙動について検討した。この結果、LISP等の言語を用いて比較的簡単にモデル化を行うことが可能であり、またルール構成を十分に吟味することでより実用的なモデルを得ることができることがわかった。これらの結果をもとに、つぎのような検討課題が得られた。

- ①交通制御のモデル化に対して、知識工学的な検討を行ったが、現在の交通制御の実際を考えると本研究で示した交通制御パターンが出力されるモデルは実用的である。しかし、現実の制御への実用的利用を検討することが今後重要である。
- ②本研究においては、従来の問題点であった複数路線に関して新たな改良を行うことが目的であり、具体的な検討を行った。しかし複数路線の場合には路線間の情報が相互に影響

響し複雑なルール構成となると思われる。ルールの詳細な評価整備方法が検討されるべきである。

- ③本研究で作成したモデルは、プロダクションシステムといっても基本的な小規模のものである。今後、実用的見地からは、情報のファジィ性等を考慮し、さらに多くの要因を加味した汎用性の高いものを構築することが望まれる。

これらの基本モデルについての検討結果をもとに具体的なシステム改良をおこなう。

4-4 交通制御エキスパートシステムの実用的改良

4-4-1 実用的エキスパートシステムの提案

前節までに示した従来の交通制御エキスパートシステムは、高速道路の交通制御におけるエキスパートシステムの適用に対して前駆的な役割を果たすとともに、このシステムを用いて、妥当な判断結果が得られ交通制御でのエキスパートシステムの適用可能性を示した。といった成果を挙げている。しかしこのシステムの実用的な検討は十分とはいえない。そこで本研究ではこのシステムの実際の適用性、操作性の向上を図るため、以下で改良と実用的エキスパートシステムの適用性について検討する。特に実用的エキスパートシステムとするための改良点としては、①入出力部の改良、②ルールベースの改良、③確信度の導入、④ファジィ性の導入の4事項が主要なものとして挙げられる。以下にその具体的な検討を行う。

(1) 入出力部の改良について

基本エキスパートシステムは、LISP言語を用いてプログラミングされており、入出力についても直接LISP言語による命令を用いて行っている。プログラム開発上では、この方法はより言語に忠実でありわかりやすいが、エキスパートシステムは、基本的にはエキスパートでない人々（非エキスパート）の利用の可能性をめざすものであり、またこれにより、代替的判断が行える点がその有用性の一つである。このことより入出力部の改良が必要となろう。

(2) ルールベースの改良について

従来のエキスパートシステムは、実用的モデルの検討の初期段階であるため、図4-3

および表4-1で示される単独の交通管制パターンを用いてルールベースを作成した。一方実際の阪神高速道路においては交通管制パターンは、これと同形式の図表全14枚で構成されており、判断を行う上で、これらの複数の管制パターンが一体的に運用されている。そこで、より実用的なシステムをめざすため、これら14枚全ての交通管制パターンに対応するようなルールベースへの改良を行うことは実用上重要である。

(3) 確信度の導入について

一般にエキスパートシステムにおける確信度とは、ある「知識」がどれだけ確実であるかを表現するための尺度である。これは0から1の間の小数で表され、0はその知識が確実に誤っていることを示し、1はその知識が確実に正しいことを示している。この確信度をシステムに導入する。このことは情報に対する不確実性を考慮しようとするもので、特に本研究で取り扱う交通制御システムでは、入力される渋滞時の情報に対する不確実性を考え、これにより得られる推論結果にも不確実な程度を付加しようというものである。

(4) ファジィ性の導入について

確信度は上記で述べたように、知識の不確実さを示すものであるが、本来この確実さの判断には人間の意識が介在し、一意に決定づけることが難しい。これを本来の判断に近づけようとする場合にはファジィ性の導入が必要となる。これにより、「知識」そのものの取り扱いを明確にすることも可能である。

以上に述べた改良点で、すべてのシステムの問題点が改善されるものではないが、実用性の向上という点からはいずれも極めて重要であると判断できる。これらの検討結果から期待される交通制御エキスパートシステムの機能を具体的に整理したものが表4-3である。

本章では、まず従来作成された交通制御エキスパートシステムの基本構造とその研究成果について検討した。さらに、この従来システムを実用的なものとするための改良点について述べた。以下では、具体的にこれら諸点の改良を試みる。このとき前節での説明からもわかるように、改良点(1)から(3)は基本的なシステムの拡張をはかるためのものであり、改良点(4)は新しい概念の導入により、エキスパートシステムにおける推論そのものを検討するためのものである。したがって(1)から(3)についてまず検討し、さらに(4)を別途検討し最終的にこれらの検討をとりまとめることにする。

表4-3 基本システムと期待される機能

	現システムの構成	期待される機能
①入出力部	<ul style="list-style-type: none"> ・LISP言語によるコマンド入力 ・ブース数出力一覧 	<ul style="list-style-type: none"> ・グラフィックスを用い、入出力画面および案内画面の明瞭化 ・数字等を用いたコマンド入力の簡略化 ・路線上の渋滞および制御ランプの表示
②ルール・ベース	<ul style="list-style-type: none"> ・交通管制パターン 1枚 ・対象路線 3～4 ・制御対象ランプ 数カ所 ・ルール数 30程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・交通管制パターン 14枚 ・対象路線 全路線 ・制御対象ランプ 全オンランプ ・ルール数 400程度
③確信度	・なし	・情報に対する不確実性の付加
④ファジィな確信度	・なし	・情報確信度に対するファジィ性の付加

4-4-2 交通管制エキスパートシステムの全体構成

ここで取り扱うエキスパートシステムは、前節でのべた基本システムと根本的には同じ構成である。したがって、プログラムの上では大きく分けて、知識ベース、推論ベース、及び入出力部の3つの部分で構成されている。ここでは、以下に各部分について改良された点を中心として述べる。

(1) 知識ベース

知識ベースは、エキスパートシステムが行う推論の基礎になる知識を蓄えておくところである。本システムでは、交通管制パターンによる開口ブース数制御用の専門知識から構成されているルールベースと、入力部から入力されたデータを保持し、推論を行う際の作業領域の役目を行うデータベースの二つにより形成されている。特に前者のルールベースは、ここでは阪神高速道路の全路線の制御を対象とする交通管制パターン表14枚を用いてルール化されているものである。したがってルール数は従来システムより大幅に増加し、その結果豊富な専門知識を蓄えたことになる。この知識を有効に利用することにより、能力の向上したエキスパートシステム構築が可能である。

(2) 推論ベース

推論ベースは、ルールベースの知識をデータベースに入力された情報に適用し推論を行

うものである。推論の方法は、基本的には従来システムと同一の前向き推論を採用した。このとき従来と全く同一の推論手順を用いると本例の場合には全路線に対する交通管制パターン表のルール化により、ルール数が増加し実行時間が増大する。そこで実行時間の短縮を図るためルールを分割し推論を二段階に実行する形とした。すなわち図4-8に示すように、①まず第一段階では、入力された渋滞情報（LINK-M JAM）が、すべてパターン情報（PATTERN-N ADOPTED）に変化させるための推論を実行する。②第二段階の推論では、パターン情報をブース数制御の情報に変化させるための推論を行う。このような推論形式とすることによりルール部内で大別される2種の判断を別々に取り扱うことができ、この結果無駄の少ない推論を実行し得ることになる。

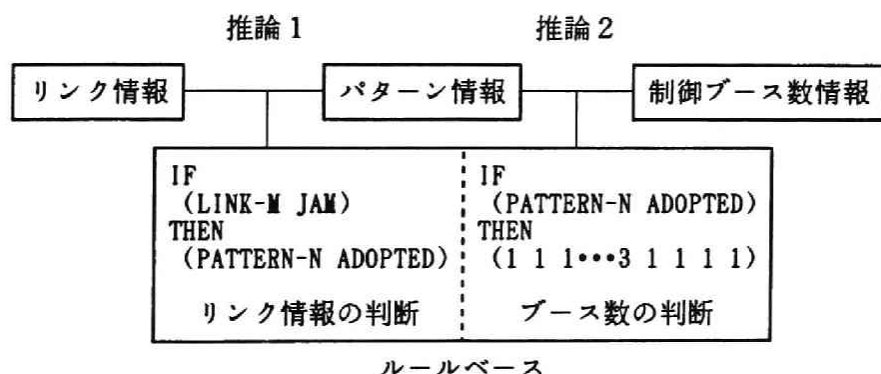


図4-8 推論ベースの内容

(3) 入出力部

エキスパートシステムのユーザは、一般にコンピュータの非専門家である。したがって、システムとの対話は容易に行える必要がある。これを実現するためのものが入出力部である。すなわち、図4-9で示すように、入出力部はシステムとユーザとの接点であり、ユーザによって入力される認知情報をシステム内の処理のためのデータに変換する。さらに推論の結果として得られた出力情報をユーザの理解可能な情報に変換する役割をもっている。したがって、システムの利用者の操作容易性を決定づける点において極めて重要であり、十分な配慮が必要である。本研究では、ビジュアルな画面表示の検討も行いプログラ

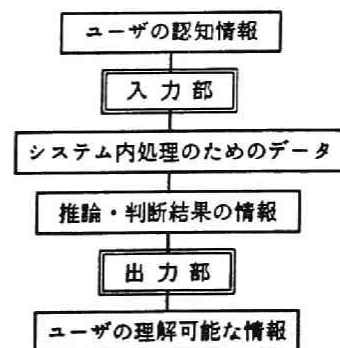


図4-9 入出力部の役割

ミングを実行した。

4-4-3 交通制御ルールに関する改良

本研究では、阪神高速道路全域を対象として全部で14枚存在する交通管制パターン表をルールとして記述し、ルールベースの改良を行う。ここで、交通制御の意味において重要となるのは同一リンクの渋滞情報であっても、これが複数の制御パターンの生起を生ずる場合である。この場合、あるオンランプを考えても制御ブース数の判断が競合することになり、この処理も内包したルール群を構成しなければならない。以下ではより実用的なルール構成について順を追って説明する。

(1) 交通制御ルールの作成

交通制御を記述するためのルールは、基本的には各管制パターンに記されている。これは、従来の研究にも述べられているように渋滞の代表的先頭区間を基準として制御のパターンを示したものである。この知識をルールとして記述するうえで、問題となるのは先頭区間に渋滞を生じていない場合の渋滞の取り扱いである。具体的には、図4-10に示すよ

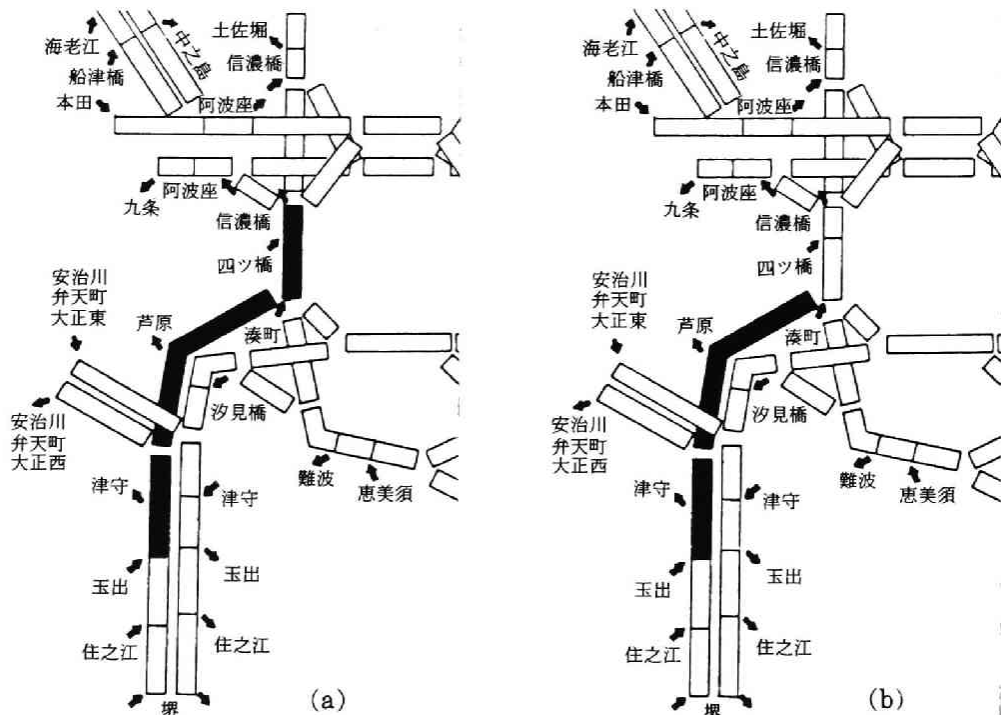


図4-10 交通制御に対する考え方の例

うな異なった渋滞の場合である。(a)の渋滞では、パターン表NO.1に相当する四ッ橋の区間を先頭に渋滞が生じており、この場合には前述の表4-1の交通管制パターン表を用いることによって③のパターンを採用する。これに対して(b)では、放射線(堺線上り)上の区間のみで渋滞が生じている。阪神高速道路での交通制御は、環状線の円滑化が最大の目的であるとされている¹²⁾。もちろん一般的な現象としても、環状線上の混雑が放射線上にいたるということは、高い頻度で見られることである。

このようなことを考えると(b)のような場合には、環状線に渋滞はなく管制パターン表からは判断が難しい。実際にも大別して、2つの制御方法を考えることができる。すなわち①管制パターン表のうち渋滞区間より上流ランプについて制御を行う。②環状線上の渋滞先頭区間が渋滞していない際には、渋滞状況が悪化していないと判断し、当該パターンの制御は行わない。

前者は代表先頭区間に渋滞がない場合にもこれを関連渋滞と見なす方法であり後者は環状線上の影響とそれ以外の場合を明確に区別しようとするものである。本研究においては①の方法を用いてルール化を試みた。したがって管制パターン表に内包されている個別な知識も取り扱うことになっている。

(2) 具体的ルール作成

次に、具体的なルール群の作成について述べる。ここでルールとして記述すべきであるのは4-4-1においても整理されているように、交通管制パターン表としては14枚、したがって対象路線は全路線、制御対象ランプが全オンランプである。こうした、多数の路線に存在する区間を計算機プログラム上で記述するために、区間には区間番号を与えこれを用いて実際の処理を行うものとした。これらの各区間は阪神高速道路において、交通状況を記述する上での基準となっており、渋滞の情報についてもこの区間を単位として得られる。またルールの形式としては図4-11に示すように前述の従来システムと基本的には同じ形式である。ここでは後述するように確信度を導入しており、個々のリンク情報およびパターン制御の末尾には、 $=CF_n = CF_1$ といった“=”で始まる変数が付加されている。

以上のような具体的手順によってすべての交通管制パターン表をルールとして記述した。その結果ルールの総数は366となった。

(3) ルール構成に関する検討

ルールの総数が増大したことにより、従来システムと比較して同一のルール構成として表現した場合には、推論による演算時間は必然的に増大する。そこで4-3-1でも述べた交通管制パターン図4-3に示すように、リンク情報をパターン情報へと変換するためのルールと、パターン情報からブース数制御の情報へと変換するためのルールの二種類として構成することにした。そして、推論の際はデータベースの内容からいずれのルール群に関連するかを考え適当と考えられるルール群のみを用い、演算時間の増大を必要最小限にした。

(4) 制御パターン競合時の処理

本例のような複数の制御パターンをルール群として用いると推論結果のブース数制御の情報は、図4-12上部に示すように一般に数種類得られることになる。従来システムでは単一の制御パターンを用いており、複数のパターンが競合することはなかった。この点一

```
(rule1-1
if
  (link-201 jam =cf)
then
  (*deposit (pattern-101 adopted =cf1))
  (*del (link-201 jam =cf))
)

(rule1-2
if
  (pattern-101 adopted =cf)
  (link-401 jam =cf)
then
  (*deposit (pattern-102 adopted =cf2))
  (*del (link-401 jam =cf))
)

(rulew1-1
if
  (pattern-101 adopted =cf)
then
  (*deposit (2 2 2 1 1 2 4 1 1 2 2 1 5 2 1
              1 2 4 2 2 1 5 2 2 2 5 2 2 2 2 =cf262))
  (*del (pattern-101 adopted =cf))
)

(rulew1-2
if
  (pattern-102 adopted =cf)
then
  (*deposit (2 2 1 1 1 1 4 1 1 2 2 1 5 2 1
              1 2 4 2 2 1 4 1 1 1 3 1 1 2 2 =cf263))
  (*del (pattern-102 adopted =cf))
)
```

図4-11 改良ルールの例

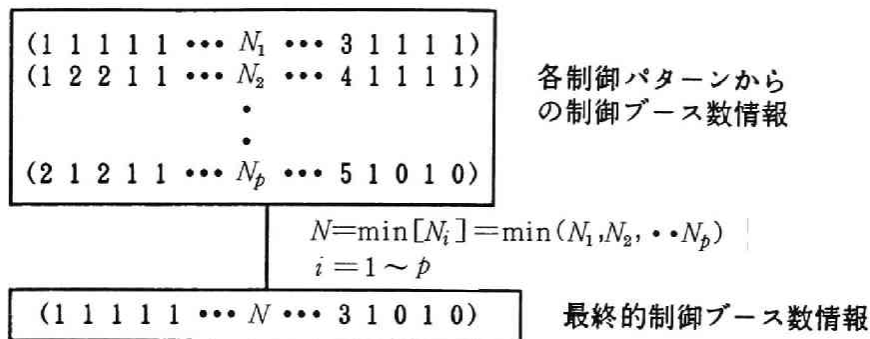


図4-12 制御パターン競合時の処理

般化のために改良が必要となるがこの作業はルールの内部メタ知識として表現される。具体的には本図に示すように複数競合するブース数制御の情報を用いて、個々のブースの開口数はその中で最小のものとするという方法である。すなわちすべてのブース数制御の情報は同時に考慮され統合的に表現されることになる。図4-13は、環状線の土佐堀出口付

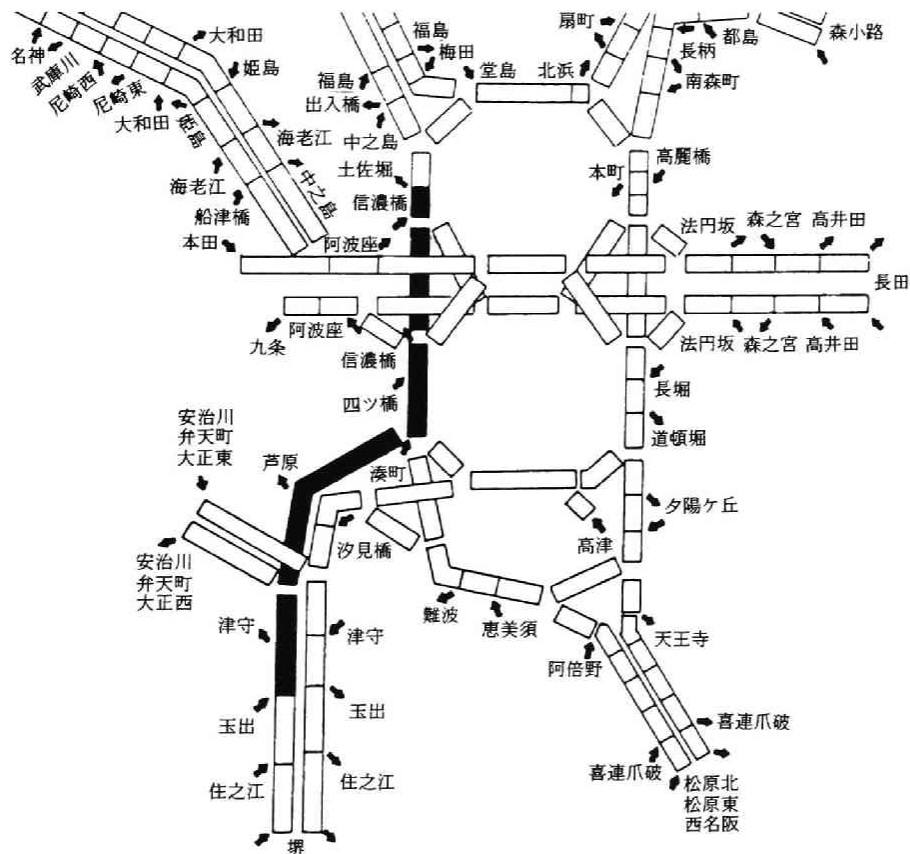


図4-13 複数路線での制御を要する例

近から四ツ橋を越え、堺線の玉出入口付近まで延伸した渋滞が存在する場合である。このときにはNO.1とNO.2といった複数の交通管制パターン表に関連して交通制御を考えることになり上記の方法は有効である。

4-4-4 入出力に関する実用的改良

入出力部はエキスパートシステムにおいては、ユーザがシステムとの対話的な処理を可能とするものである。一般にエキスパートシステムユーザが非専門家であることを考えると、画面上の表現の解釈容易性は重要である。本研究では入出力部の改良として視覚的にも利用者への情報伝達の容易性の向上を考えた。

(1) 入力部に関する改良

入力部は、ユーザの与える入力情報をシステムの理解できるデータに変換する部分である。従来システムにおいてはデータベースの情報の登録という形で、このシステムにおいても使用したLISPの命令文として入力を行っていた。これは、エキスパートシステムの基本構造をあきらかにする点で有効な方法であるといえる。

前項で述べた基本システムでは限定された交通管制パターン表のみをルールとして採用しており入力する対象渋滞区間は多くても5～6区間であり、上記のような入力方法を用いてもとくに操作性の低下が生じることは考えられない。これに対し改良システムにおいては阪神高速道路全域を対象とし、前述したようにルール数も多くなっている。したがって入力時に必要な渋滞区間も増加したため、従来の入力方法ではシステムの利用者利便性を向上させることが難しくなっている。そこで本研究では従来方法を改め選択メニューから番号を用いて入力し、これをシステム内で処理可能な形の情報に変換する入力部を作成した。

具体的にはたとえばユーザが、ディスプレイに現れる画面を参照し渋滞区間を番号「1」という数字を用いて入力する。すると入力部ではこの数値「1」をシステム内の「(LINK-1 JAM)」という形のデータに変換する。このような実行形式をもちいることで、入力すべき渋滞区間が多少増大しても画面上で「2」、「3」、…と数値入力を行うことで従来と同様のデータを入力が可能となり操作の容易性が向上した。

また入力データの増加により、従来システムに比してデータの誤入力の可能性が増大す

るがこの点についても、入力操作が単純化されたため改善されるといえる。またシステムの対話的操作という観点から、順次入力すべき情報に関する案内画面を導入するものとした。これにより、改良システムでは各自点においてシステムでの推論状態、データ入力状態などがユーザに表示されシステムの具体的な挙動を把握しながら操作が可能になった。

(2) 出力部に関する改良

出力部はシステム内部で推論が実行された結果、この判断結果である出力情報をユーザに提供する部分である。そのためユーザに容易に理解可能形式に変換し出力することが主要な役割である。従来システムにおいても、各制御ブースの開口ブース数を示すことで推論結果を表現していたがこれはシステム内部の結論データを出力するものである。本研究では視覚的表現を用いることで出力結果の理解を容易にすることが可能と考えグラフィックスを用いた表示を中心として改良を行った。

具体的には以下に述べるような2つのステップが用いられる。①従来システムの内部で用いられていた「EBISUCHO...1-BOOTH」といった形式のデータを改良システムでは全ブースの開口数を列挙したベクトルとして「(1 1 1 ... 2 1 0)」という形式で表現した。したがって従来システムで表示されていたブース名称が省略されたことにより、処理上の効率は向上したが、これを各ブースと対応させる必要が生じた。ここで、ベクトルの要素位置とブース名称を対照した内部知識を用いる。すなわち、一番始めの「1」は制御対象が堂島ブースで、その開口ブース数が1個であるというデータに変換される。2番目の「1」も同様に高麗橋1ブースというように変換される。以下同様な作業を繰り返し各ブースに対応した開口数が求められる。②さらに上記のランプ位置の決定されたデータを用いてディスプレイ上の阪神高速道路の路線図で制御をおこなうものとした。さらに制御ブース数については別の画面で「堂島 ●○」という形で開口ブース数が表示可能なものとした。このようにして制御ランプの位置、ブース数が一覧として表示される。

以上のようにシステム内部のデータから実際の制御ブースの位置が確認でき、通常開口ブース数に対する制御ブース数という形でユーザが理解可能なシステムになったといえる。

4-4-5 確信度の導入に関する改良

確信度 (CF:certainty factor) はある「知識」がどの程度確実であるかを表現するた

めの付加因子である。本節では、一般のエキスパートシステムにも用いられている形の C
 F の導入を検討した¹³⁾。

(1) プロダクションルールへの確信度の導入

一般にプロダクションルールは、

$$\begin{array}{ll} \text{IF} & \text{条件 1, 条件 2, } \dots, \text{条件 } n \\ \text{THEN} & \text{結論 1, 結論 2, } \dots, \text{結論 } m \end{array} \quad (4-2)$$

で表される。この場合には当然結論 1, …, 結論 m が実行される。しかしここでの推論には条件部が成り立つ際の結論の確かさは含まれない。そこで次のような CF を用いたルールを用いて実行することを考える。

$$\begin{array}{ll} \text{IF} & \text{条件 1: } C_1, \text{条件 2: } C_2, \dots, \text{条件 } n: C_n \\ \text{THEN} & \text{結論 1: } C_1, \text{結論 2: } C_2, \dots, \text{結論 } m: C_m \end{array} \quad (4-3)$$

ここで条件部に存在する CF は、与えられた個々の条件の成立についての確信の程度を示し、結論部に付加されている CF は推論を実行した結果である結論に対する確実性を示すものである。このような場合以下の各点が問題となる。

- ①条件部での個々の CF (C_1, C_2, \dots, C_n)を用いて、どのように条件全体の $CF(C_{in})$ とするか。
- ②条件部全体の CF からルール中の結論の $CF(C_1, C_2, \dots, C_m)$ を使って結論結果に対する $CF(C_{out})$ をどのようにして求めるか。
- ③2つ以上のルールが同一結論を出す時、それぞれの推論結果の CF から結論に対する全体的な $CF(C_i)$ をどうするか。

本研究ではこれに対し具体的に以下のような方法を採用した。

①条件部全体の CF として

$$C_{in} = \min(C_1, C_2, \dots, C_m) \quad (4-4)$$

とした。これは一番小さな CF を採用することにより、条件部を過大評価をしないという主旨である。

②結論 j に対する CF として

$$C_{out,j} = C_{in} \times C_j \quad (4-5)$$

とした。これは、条件部が C_{in} の確信度で成り立つ上で結論 j を行うということから、

両者の成立の程度の合成として考えようとするものである。

③同じ結論を導く k 個のルール CF を C_1, C_2, \dots, C_k とすると、

$$C = \max(C_1, C_2, \dots, C_k) \quad (4-6)$$

とした。これは、同じ結論が異なる推論プロセスから得られた場合には、もっとも結論づけられる程度の高いものを用いようとするものである。

(2) 確信度の具体的取り扱い

交通制御ルールに関する改良で述べたように、本システムでは2段階ルール構成となっている。まず渋滞情報をパターン制御情報に変換するルール群について述べる。ここでの CF は各リンクの渋滞状況についての確信程度を示すものである。具体的には「特定区間が渋滞している」という情報の程度を示すものである。一般に、エキスパートシステムでは CF は+1（完全に真）～-1（完全に偽）の値が用いられることが多い。ここでは程度を示すために0～1の値を用いる。 CF そのものに物理的意味を持たせること難しいが、本研究では、①渋滞状況の程度を示す（渋滞でも交通密度の大きいものから小さいものまである。）②渋滞情報そのものの不確実性（渋滞が発生に対する情報入手の信頼性に起因するもの）とし、これをユーザが決定し入力するものとする。

これに対して結論部の CF はエキスパートによりルール作成の際にあらかじめ設定しているものである。したがってユーザの入力値ではなく内部知識として保存されている値である。これは条件部が成り立つとき結論がどの程度の確実性をもって主張できるかはエキスパートの判断を要するものと考えていることになる。

ここでは、この内部に保存される結論部の CF について、エキスパートの判断の代替として以下の方法を用いて設定した。ここでは具体例によりその方法を示す。いま図4-14の(a)～(c)までの若干程度の異なる渋滞状況を考える。(a)では表4-1よりパターン4を採用するが、(b),(c)のような場合には渋滞の延伸程度が若干短く完全に制御パターン4を採用する条件には一致しない。しかしこれら(b),(c)の状況においては(a)の渋滞状況に遅からず移行すると考えられる。したがって、このような際にもあらかじめパターン4を用いた制御を実施することも有効である。また実際の阪神高速道路でも本例(b),(c)のような場合は予防的に(a)と同様な制御が経験的におこなわれている。

以上のように本例では(a)～(c)のいずれも同じ制御パターン4を採用する推論が実行さ

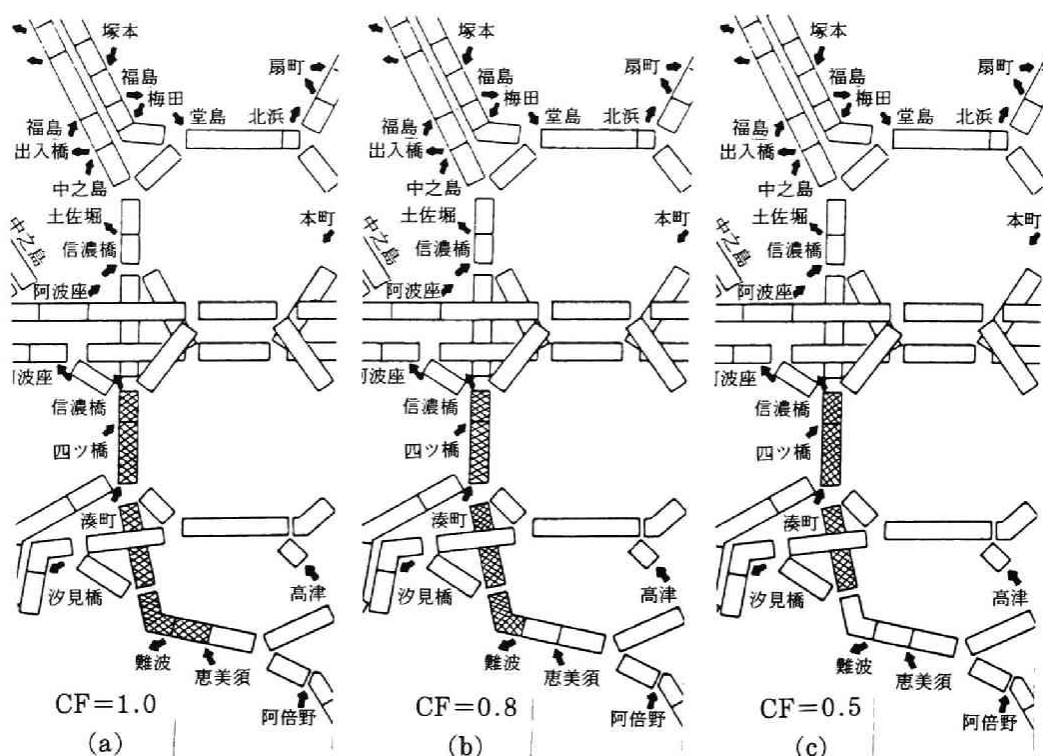


図4-14 結論部における確信度の例

れる。このときの渋滞の程度が CF として表現され(b)の場合は0.8で(c)の場合は0.5といった値が設定される。その他の場合も同様にして対象とする区間の延伸距離の組合せにより、1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.5の最大5段階の値を用いて結論部の CF としている。次にパターン制御の情報からブース数制御ルール群に付加される CF について考える。この場合条件部の CF は前述の渋滞情報をパターン制御情報に変換の際決定されるものである。また結論部の CF は特に不確実性を含むとは考えられないため一律に1.0とした。

さらに推論の最終的結論であるブース数の情報から得られた場合のルール競合の CF 決定について述べる。いくつかの競合する判断結果が得られこの時、同一のブース数が複数の判断結果が提示される場合は、結論に競合は生じていない。したがって各々の結論の最も確実性の高い値をそのランプの CF とする。また逆に各推論より得られた各結論の開口ブース数が異なっている場合それぞれの CF をもつ各結論から統合的な結論を導き出すことになり、全体の CF としては、判断の安全側を採用するという観点から最小のものを採用する。

以上に述べたようなCFの値に関する処理手順を例をもって示したものが図4-15である。

① 渋滞情報からパターン制御情報に変換するルール

```

link-201 jam 0.8
IF link-219 jam 0.7 THEN pattern-104 adopted 0.8
link-218 jam 0.6
      [user input]                                [system]

```

条件部全体のCF → $\min(0.8, 0.7, 0.6) = 0.6$

推論結論部のCF → $0.8 \cdot 0.6 = 0.48$

② パターン制御からブース数制御情報に変換するルール

```

IF pattern-104 adopted CF THEN (2 2 ... 1 2 2) 1.0
      [from ①]                                [system]

```

条件部全体のCF → 0.48

推論結論部のCF → $0.48 \cdot 1.0 = 0.48$

③ 複数のブース制御情報が得られた場合

(2 1 2 1 ... 1 2 1 1) CF=0.56

(2 1 1 1 ... 1 2 1 2) CF=0.85

(2 1 2 2 ... 1 2 2 1) CF=0.45

-----[inference]-----

(2 1 1 1 ... 1 2 1 1) : No. of booths

.85 .85 .45 .4585 .85 .45 .45 : certainty factors

図4-15 確信度の値の処理手順

4-5 実用的なシステム改良とその結果

4-5-1 改良型エキスパートシステムの実用性

前章までに行われた各種の検討の結果、実用的な交通制御エキスパートシステムが構築された。ここでは、このシステムの挙動について順を追って説明する。

(1) システムの起動と実行の概要

本システムは基本システムと同様LISP言語を用いて構築されており、実際のプログラムはNECのPC9801上で動くGCLISPによって記述されている。システム起動にはまずGCLISPを起動させる。その後LISPで書かれた推論ベース、各種モジュールを読み込ませる。

以上の操作後数分経過して「(S-1)と入力して下さい」のメッセージが画面に表示される。本システムでは、図4-16に示すようにすべての操作を一連の流れに沿って行うことができる。そのため第1ステップ同様の「(S-2)」、「(S-3)」といった文字の入力により次の段階（モジュール）に移ることができる。その後渋滞情報データ、CF値などの入力を要するがこれも同様に実行すること

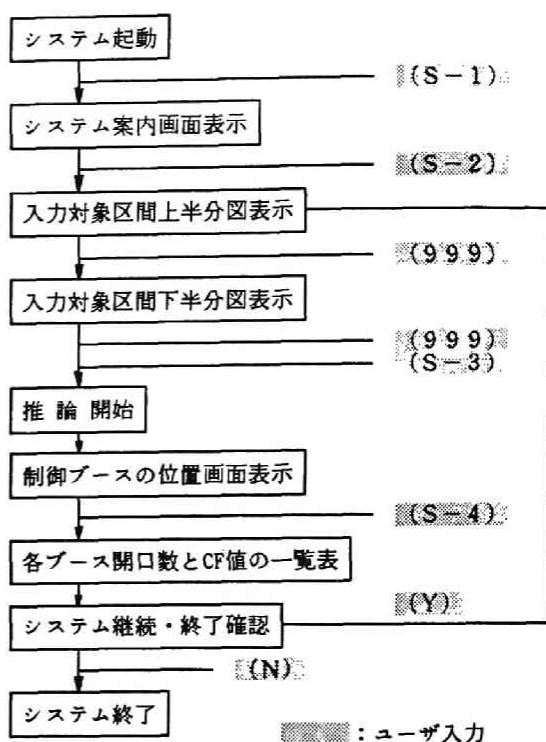


図4-16 エキスパートシステム操作手順

ができる。本図からもわかるように推論実施後の出力結果は第3ステップ、第4ステップに相当している。最終的には作業の継続と終了の選択をおこなうことで一連の判断は終了する。したがって交通制御における都市高速道路の交通状態の入力からこれをもとに交通制御の内容（ブース状況）を導出する推論が行われたことになる。

(2) 実行例による実用性の検証

ここでは、改良されたエキスパートシステムを用いて交通制御の判断を実行した例を示し、その実用性を検証する。実行例としては阪神高速道路において以下の事象が発生した場合を考えてみる。

- (a) 環状線北浜出口を先頭とした渋滞が空港線上り加島入口および環状線方向の信濃橋入口まで延伸
(交通管制パターン表NO.3に対応)

(b) 空港線塚本出口を先頭とした渋滞が環状線の信濃橋入口まで延伸

(交通管制パターン表NO.11の状況に対応)

(c) 環状線の土佐堀出口を先頭とした渋滞が湊町まで延伸

(交通管制パターン表NO.2の状況に対応)

(d) 環状線信濃橋先頭とした渋滞が湊町まで延伸し堺線玉出入口まで、環状線恵美須入口までそして渡り線高津入口まで3方向に分岐延伸

(交通管制パターン表NO.1の状況に対応)

以上の4事象がほぼ同時に発生した場合には本線上の渋滞状況は図4-17に示すようであり、環状線の左側の部分が渋滞した場合である。この際のシステムの実行について以下に示す。

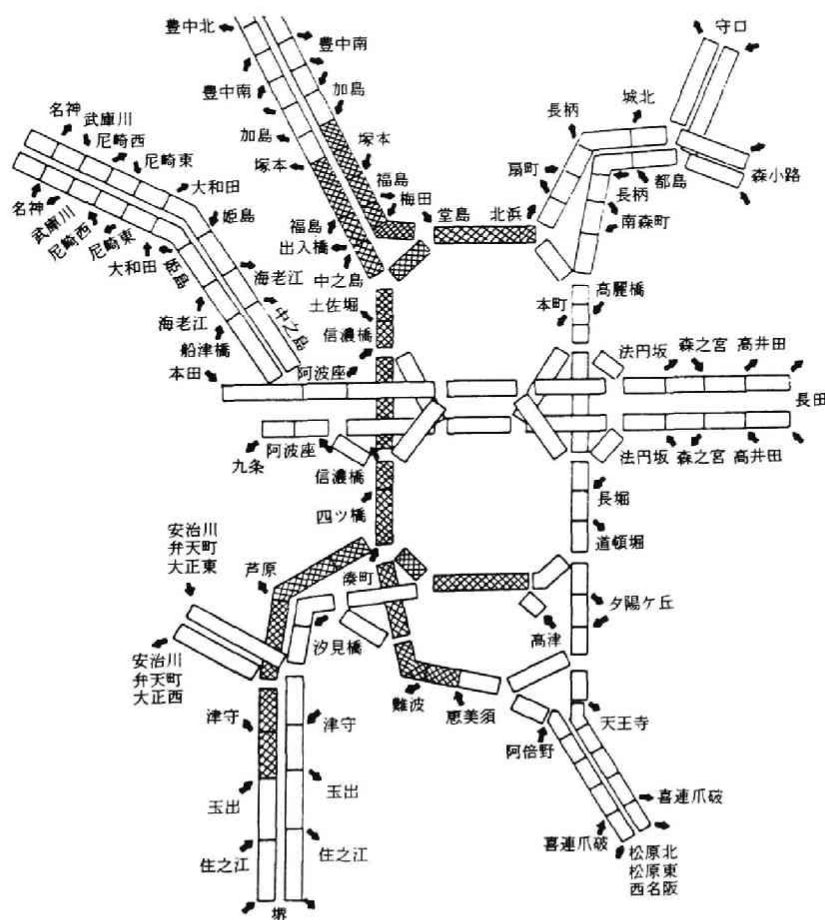


図4-17 制御対象渋滞状況の例

〔事象の入力〕

- ①「(S-1)」と入力することにより図4-18のように入力対象区間および制御対象ランプ一覧の案内画面が表示される。これは次段階における渋滞状況の入力に対して、路線全体の表示を行って操作を容易に行えるようにするものである。
- ②「(S-2)と入力して下さい」のメッセージが表示される。これに従い(S-2)を入力する。この結果図4-19のように事象の入力対象区間図の上半部分が表示される。
- ③この時左側の路線図を参照しながら渋滞区間と確信度を一対にして入力する。このとき図中に示すように各区間は番号が付されている。図4-20は上半部の渋滞区間を入力し終った時の画面であり、入力された区間は黄色から赤色に変化している。次に入力対象区間図の下半部に移る際は、画面表示に従い「999」の数字を入力する。
- ④下半部が表示され表示され、上半部と同様に渋滞区間と確信度を入力する。図4-21は阪神高速道路の下半部分に相当する路線図である。図4-22はデータを入力し終ったときの画面である。

本例では、上半部分の区間の渋滞情報に対しては確信度を0.5、下半部分の区間の渋滞情報に対しては確信度を0.6としている。

〔推論の実行〕

- ⑤渋滞情報を入力し、「(S-3)と入力して下さい」と画面表示が出た後、これを入力することで推論が開始される。推論中はシステムが実際に作動中であることを示すため「ただ今推論中です」と画面に表示される。本例では1分30秒程度の推論実行時間であった。

〔結果出力〕

- ⑥出力画面は2種類存在する。第1画面は図4-23に示すように制御されるブースの位置を阪神高速道路の路線図上で紫色に点灯して示したものである。
- ⑦第2画面は「(S-4)を入力して下さい」の指示にしたがい、これを入力した後得られる。ここでは、図4-24に示すように個々のブースの開閉ブース数と確信度が一覧になったものである。赤は制御されているブースで白は制御されていないブースである。たとえば堂島の「● ○」は1ブース開口していることを示している。また住之江の「● ●」、玉出の「● ●」は両入力路約30分ごとに閉鎖することを意味する。

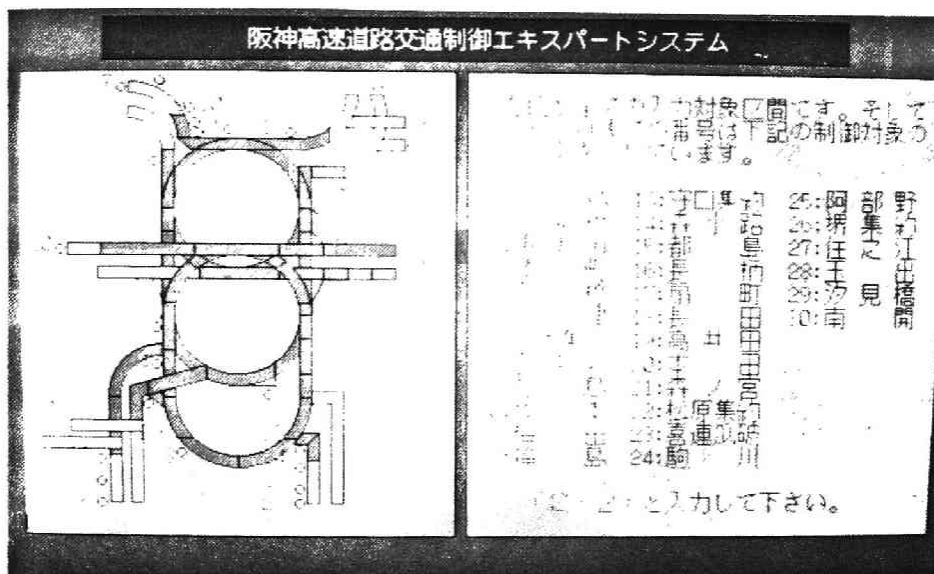


図 4 - 18 システム案内画面

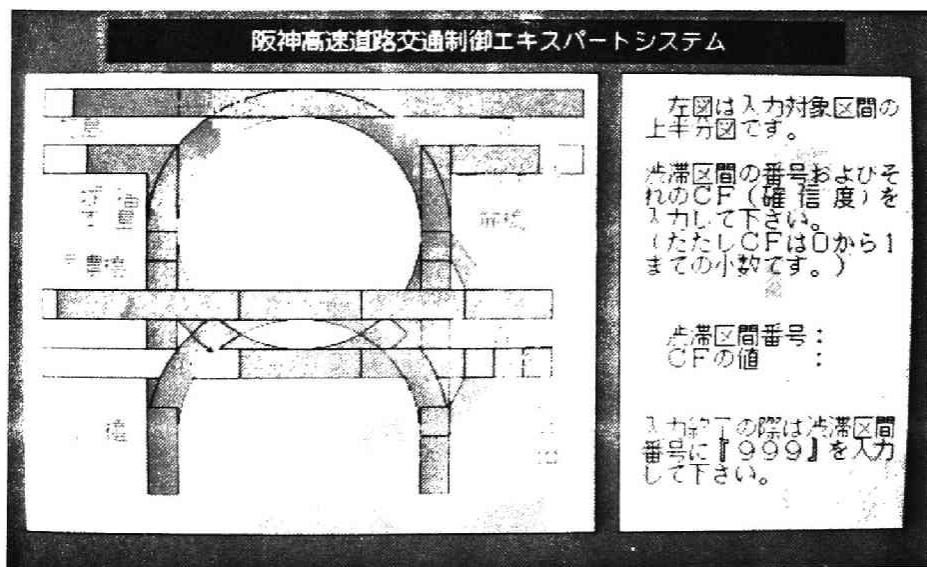


図 4 - 19 渋滞区間入力用画面(上部区間)

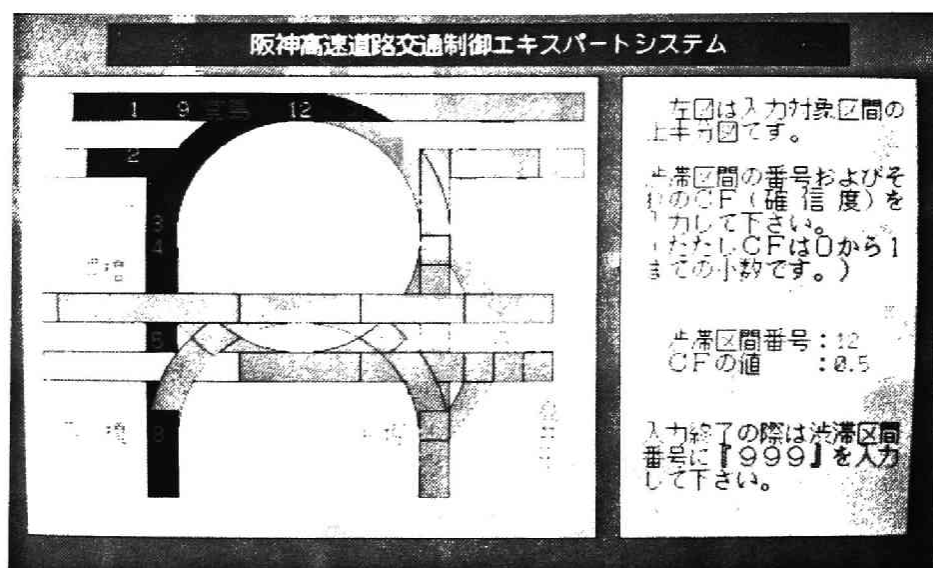


図4-20 渋滞区間入力時の画面（上部区間）

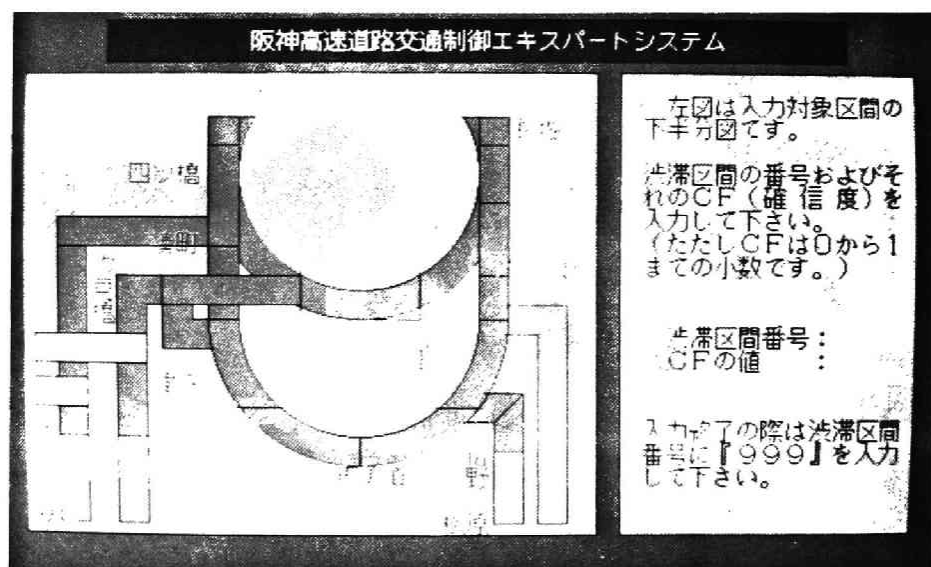


図4-21 渋滞区間入力用画面（下部区間）

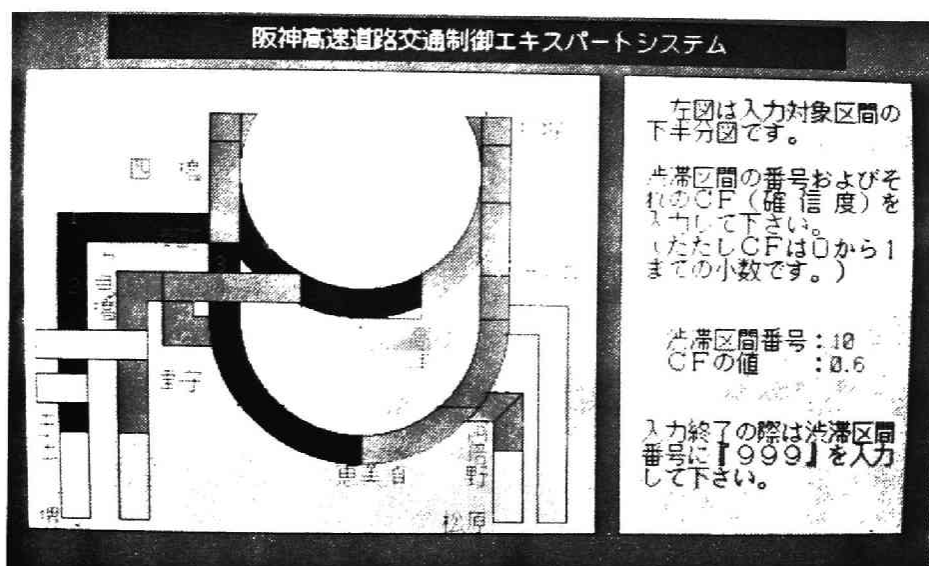


図4-22 渋滞区間入力時の画面(下部区間)

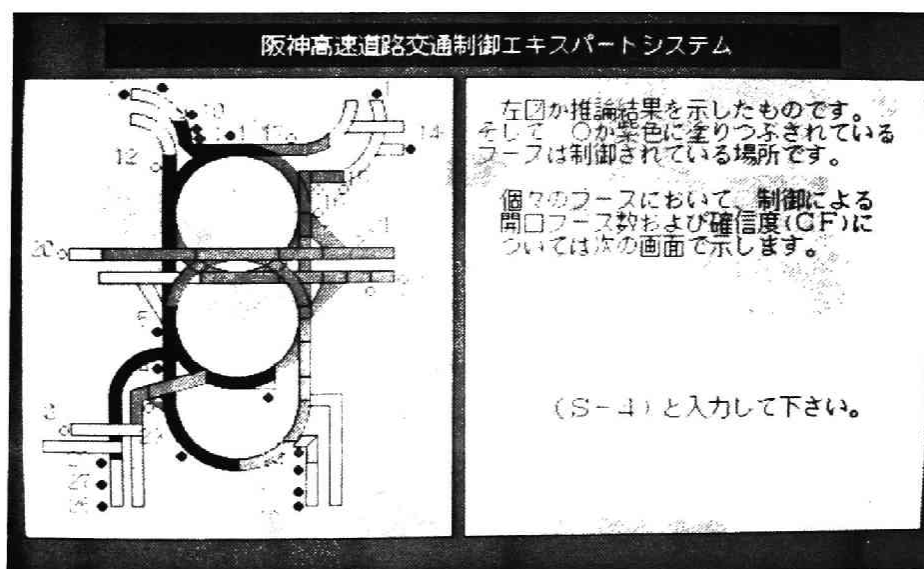


図4-23 制御入路の位置図(出力1)

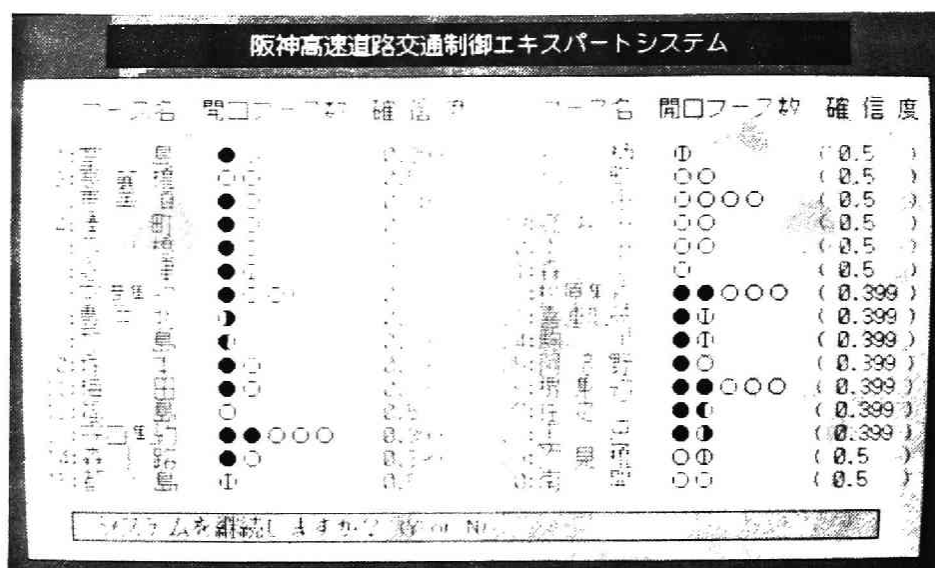


図4-24 ブース制御状況の表示（出力2）

〔システムの継続〕

⑧①～⑦の手順で入力から出力までの一連の操作が行える。しかし渋滞情報に変化が生じたとき等のために結果出力後、画面に「システムを継続しますか」と表示される。これに対し「Y」と入力するとシステムの作業が継続し、「N」と入力するとシステムは作業終了する。

ここで「Y」と入力した時には、案内画面が表示され「1」と入力すると新規入力になり、まったく新しい情報を入力でき別の情報にもとづく推論が可能になる。また「2」と入力すると先に入力した状態情報は残されており、新たな渋滞発生した区間を入力することで変化した渋滞状況の入力とすることができる。

（3）システムの実用性に関する整理

前項で実用例を用いた具体的実行例を示した。この結果従来システムと比してとくに実用性の向上と考えられる点を以下に整理する。

- ①すべてのモジュールが一連の流れに沿って操作可能であるため操作上の問題点は減少し実用性が向上した。また視覚的な表現を用いており入出力も対話型処理に適している。

- ②全路線を対象としたルールを採用したことによって、現在阪神高速道路上で行われている交通制御の各パターンは網羅された。したがって当然のことながら全域を対象とした交通制御の判断が本システムで代替的に行われている。
- ③確信度を用いたことにより情報の信頼程度を記述することができ、またルール内部において渋滞状況の程度の差異を数値として表現することが可能となった。
- ④ルール数の増大により推論の実行時間は基本的には増加したが、ルール群の分割および計算機の性能向上（本例はNEC9801VX2上で数値演算プロセッサ80287使用）により演算の高速化が行われており実用上の問題はない。

4-5-2 交通制御ルールの実用的変更

したがって、新たな交通制御ルールを考える場合には、知識ベースの変更を行うことで、判断の異なるエキスパートシステムが作成される。

（１）交通制御ルールの変更

第２章で述べたように交通管制パターン表は本来代表的先頭区間からの渋滞に対して制御を実施するために作成されたものである。したがって、先頭区間の渋滞が発生していない際の考え方は、大別して２種類存在する。これについてはすでに第３章で検討した。

ここでは、「代表的先頭区間の渋滞が発生していないときには、関連区間が渋滞しても特にパターン制御は実施しない。」という考え方に基づくことにする。これは阪神高速道路における「環状線を主とした都市中心部分の円滑化を図る。」という目的を優先的にルール構成に含めたものである。

具体的に、ルール群において変更する箇所は、既出図４－１５の②で示す第２段階目の推論におけるプロダクションルール群の結論部のみを変更すればよい。具体的には、この交通制御ルールの変更によって制御が行われないケースが基本的に増加する。そこでこの最終的結論部である開口ブース数の情報を通常ブース数に変更すればよいことになる。これにより、該当パターンにおいては事実上「 A 制御を実施しない」というルールを採用したことになる。

このように、基本的に「知識ベース」の部分的変更であるため「入出力部」および「推論ベース」には変更がなく、「知識ベース」においてもルール構成上の変更がない。

これは、本エキスパートシステムのモジュール性の高さを示すものである。

(2) 変更ルールを用いたシステムの挙動

変更前のシステムと変更後のシステムの判断の相違を比較するために例として、

- ①交通管制パターン表のNO.3の先頭区間である北浜出口から堂島入口までの区間
- ②交通管制パターン表のNO.1の先頭区間である信濃橋出口から湊町入口までの区間が非渋滞である場合を考えた。

このときの、まず制御ルールの変更がない従来のシステムによる判断結果としては図4-25に示すようなブース制御となる。これに対して、交通制御ルール変更後は図4-26に

阪神高速道路交通制御エキスパートシステム					
ブース名	開口ブース数	確信度	ブース名	開口ブース数	確信度
1: 堂島	●○	(0.399)	16: 長柄	①	(0.5)
2: 高麗	○○	(0.5)	17: 扇町	○○	(0.5)
3: 恵美	●○	(0.399)	18: 長田	○○○○	(0.5)
4: 湊町	●○	(0.399)	19: 高井	○○	(0.5)
5: 四ツ	●○	(0.399)	20: 本田	○○	(0.5)
6: 高津	●①	(0.399)	21: 森ノ宮	○	(0.5)
7: 空集	●○○○	(0.399)	22: 松原	●●○○○	(0.399)
8: 豊中	①	(0.399)	23: 喜連瓜	●①	(0.399)
9: 加島	●○	(0.399)	24: 駒川	●①	(0.399)
10: 塚本	●○	(0.399)	25: 阿倍野	●○	(0.399)
11: 梅田	●○	(0.399)	26: 堺集	●●○○○	(0.399)
12: 福島	○	(0.5)	27: 住之江	●①	(0.399)
13: 守口	●●○○○	(0.399)	28: 玉出	●①	(0.399)
14: 森小路	●○	(0.399)	29: 汐見	○○①	(0.5)
15: 都島	①	(0.5)	30: 南開	○○	(0.5)

システムを継続しますか？ (Y or N)

図4-25 開口ブース数の判断結果 (旧ルール)

阪神高速道路交通制御エキスパートシステム					
ブース名	開口ブース数	確信度	ブース名	開口ブース数	確信度
1: 堂島	○○	(0.599)	16: 長柄	①	(0.599)
2: 高麗	○○	(0.599)	17: 扇町	○○	(0.599)
3: 恵美	●○	(0.399)	18: 長田	○○○○	(0.599)
4: 湊町	●○	(0.399)	19: 高井	○○	(0.599)
5: 四ツ	●○	(0.399)	20: 本田	○○	(0.599)
6: 高津	●①	(0.399)	21: 森ノ宮	○	(0.599)
7: 空集	○○○○	(0.599)	22: 松原	●●○○○	(0.399)
8: 豊中	①	(0.599)	23: 喜連瓜	●①	(0.399)
9: 加島	①	(0.599)	24: 駒川	●①	(0.399)
10: 塚本	○○	(0.599)	25: 阿倍野	●○	(0.399)
11: 梅田	○○	(0.599)	26: 堺集	●●○○○	(0.399)
12: 福島	○	(0.599)	27: 住之江	●①	(0.399)
13: 守口	○○○○○	(0.599)	28: 玉出	●①	(0.399)
14: 森小路	○○	(0.599)	29: 汐見	○○①	(0.599)
15: 都島	①	(0.599)	30: 南開	○○	(0.599)

システムを継続しますか？ (Y or N)

図4-26 開口ブース数の判断結果 (新ルール)

示される結果となる。この両者を比較すると、基本的に制御されるブース数が減少し、制御程度の緩和された結果となっていることがわかる。

またこの場合、ルール数そのものは変化していないため、判断結果を得るまでの推論の実行時間には大きな差異は生じなかった。このように、いずれのルールを用いても基本的性能は同じであり、交通制御ルールの基本的考え方の差異により、両ルールを使い分けることが可能である。

これは、エキスパートシステムにおける、制御ルール変更の際のプログラミングの容易性、ルールの変更容易性を示すものであり、今後交通制御ルールの一層の検討、吟味を行ううえでの汎用性が確認された。

4-5-3 ファジィ性導入に関する検討

この節ではエキスパートシステムのファジィ性導入について検討する。一般にファジィなエキスパートシステムについては、すでにいくつかの検討がなされているが、ここでは、その基本的な検討として、第3章の4節で述べた確信度にファジィ性に導入することを試みる。したがって、具体的には図4-26に示すように従来の確信度に対して、ファジィ数としての表現を持つ確信度を用いる。

具体的な検討として、すでに述べたようにファジィ性を導入するエキスパートシステムは演算のプロセス導入の容易性と実用的モデルの検討の初期段階とするため従来作成されたものである。すなわち実際の交通制御情報としては表4-2に示す交通管制パターン表を用いて構築されている。

ここでの変更は、推論過程等、基本的には従来システムと同一構造をもつため「入出力部」、「知識ベース」、「推論ベース」ともに大きな変更箇所はない。ただ従来のクリスプな数に対して、一定の幅をもつファジィな確信度を取り扱うため「入出力部」および「推論ベース」を部分的に改良した。すなわち入力の際にはファジィな確信度をユーザが情報に付加できるようにし、また出力の際にも制御ブース情報の他にファジィな確信度を理解可能となるように図形出力できるようにした。

また、「推論ベース」では、拡張原理を用いたファジィな確信度の計算が行えるように改良した。この具体的内容を示したものが図4-27である。従来システムの①の形式、すなわちリンク渋滞情報をパターン制御情報に変換するルール群では、条件部にファジィな

- ① if link-*m* jam *F-CF* then pattern-*n* adopted *CF*



- ② if pattern-*n* adopted *F-CF* then EBISU---->1-B00TH *F-CF*
MINATO--->1-B00TH

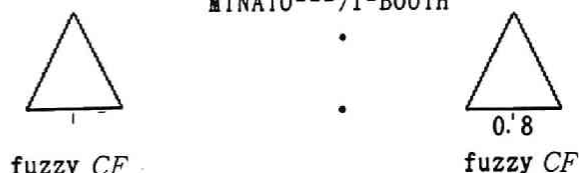


図4-27 ファジィ確信度を導入したルール

確信度、結論部は従来型の確信度を付した。また②の形式、すなわち制御情報決定のためのルール群においては、条件部、結論部ともにファジィな確信度を導入した。ここでは、具体的な結論部の確信度の値として、①の場合は従来確信度で1.0、②の場合はファジィな確信度で中心値を0.8と設定した。

システムの具体的な取り扱いは前章で用いた手法と同様にした。ここでは確信度の幅を入力時にユーザに決めてもらい、それ以下のルールにおける確信度の幅はこれと同一とした。このようにしてファジィ数の初歩的な計算を実行する。具体的には、条件部全体の確信度は中心値を比較することにより最小値が決定できる。また一つのルールの結論の確信度については、①の場合には、ファジィ数とクリスプ数の積演算であり、幅は変化せず中心値のみが移動した形になる。また②の場合の結論部の確信度の決定においては、ファジィ数同士積演算になり、拡張原理を用いた方法により求められる（拡張原理を用いたファジィ数の演算は第2章においてすでに述べたとおりである）。

具体的な挙動は従来システムと基本的に同じであるが、システムを起動させると渋滞情報の入力の前にファジィな確信度の幅をシステムが質問される。この入力後にLISP言語であるDATABASE関数を用いて渋滞情報とファジィ数の中心値を入力する。その後START関数を用いることにより推論が開始される。推論が終了後は図4-28に示すように制御ベース情報が表示され、さらにファジィな確信度が図形表示される。

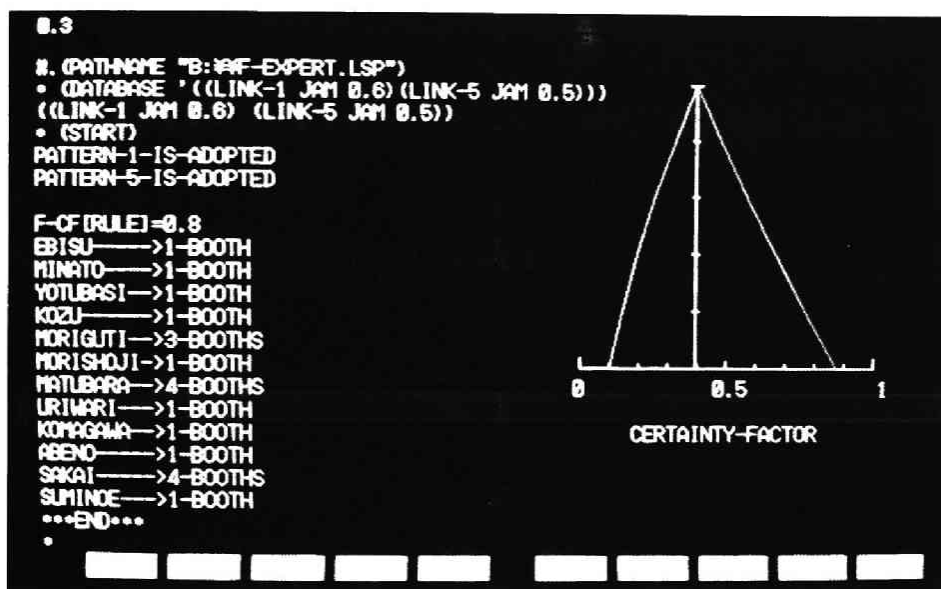


図4-28 ファジィ確信度をもつ場合の出力例

このようなファジィ性の導入は情報の持つ不確実性を考慮する上で有効であり今後は、推論自身にファジィ性を含んだいわゆるファジィエキスパートシステムの利用も考えられる。

4-6 結 語

本研究は、都市高速道路の交通制御に関して、エキスパートシステムの実用的な開発を目指し各種の検討を行った。今日、人工知能、知識工学分野の各種研究開発が盛んであり、一般にも多く用いられるようになってきた。このような、進歩的な計算機技術を交通工学の分野においても取入れるべき時代となってきた。こうしたことから本研究では、各章で具体的な検討を行い、以下に示すような結論を得た。

- ①すでに開発された交通制御エキスパートシステムの概略を検討するとともに、この改良すべき点について整理を行った。この際に従来基本となっている多くのエキスパートシステムに関する検討事項を参考とし、実用的システム構築のための指針を示した。
- ②具体的な交通制御エキスパートシステムとして、阪神高速道路大阪地区の全路線を中心として検討を行った。入出力部、ルールベースの整備、確信度の導入によって、より実

用的なエキスパートシステムの作成を行った。

- ③このエキスパートシステムの実用的適用性を試みるために、ルールベースの変更を行った。これは実際の交通制御上の判断過程においても、数種の判断基準のもとで行われており検討が必要である。また確信度に関しても不確実性の基本的な考え方にに基づき、ファジィ性を導入することによってより現実的で、有効な表現が可能となった。

現在の技術的動向をみると、一般にはエキスパートシステムの各分野での先駆的開発を中心とするものが多く、個々のシステムは必ずしも実用的検討が十分とはいえないが、現在のところいくつかの利用価値を有するものと考えて開発を進めていく必要がある。この点を特に交通工学的応用という点から整理すると以下のようなものである。

- ①ルールベースを構築する上で経験的知識、過去の分析結果などの蓄積された知識を整理することで用いることができる。ここで交通制御についての知識をルールの形として表現することで知識の明確化が行える。
- ②いわゆるコンサルティングシステムとして用いることができる。この場合は、利用者親和性が問題となるが、パーソナルコンピュータ等を用いたビジュアルな表現がこれを支援¹⁵⁾すると考えられる。
- ③知識の変更が容易である。すなわちモジュール性が高いために知識ベース部の変更で知的判断を検討、更新することが可能である。交通制御においても新たな制御理念に基づく変更が容易に行いうる。
- ④計算機の進歩を考えると、パーソナルコンピュータ程度のシステムにおいても実行性を持つものが構築できる。これは、システムの独立性を保証するので、従来の大型機連動型の利用ではなく、ローカルシステムとしてのオフライン利用を可能とするものである。
- ⑤すでにエキスパートシェルと言われるエキスパートシステム構築ツールが多く開発され、高度なプログラミング技術を持たなくても作成が可能である。とくに一般の交通工学上の問題の解決には、この方法の適用が重要である。

交通工学的なエキスパートシステムの適用としては、このような特徴を生かすことを考えることが今後の重要な課題である。また、現在の計算機技術を生かすためには、計算機エンジニアと各分野のエンジニアの協力が必要となるかもしれない。土木計画の分野にお

いても、計算機の進歩などが受け入れられる時代となった。しかしなおこの方面の検討については、十分な理解を得られていないのが実状である。この正しい理解と内容の具体的検討が早急に必要であり、この点一層の研究の進展が望まれる。

[第4章 参考文献]

- 1) 阪神高速道路公団・(財)高速道路調査会：阪神高速道路の交通管制に関する研究報告書，1983，1986.
- 2) 白井良明・辻井潤一：人工知能，岩波講座情報科学22，岩波書店，1986.
- 3) 上野晴樹：知識工学入門，オーム社，1985.
- 4) 上野晴樹：知識の表現と推論の制御，知識工学のシステム制御への応用，pp.23-37，日本自動制御協会，1986.
- 5) 大須賀節雄編著：知識ベース入門，オーム社，1986.
- 6) 安西祐一郎ら：LISPで学ぶ認知心理学 1，2，東京大学出版会，1983.
- 7) 白石成人・古田均ら：プロダクションシステムを用いた構造物の健全度評価，第7回信頼性工学シンポジウム前刷集，日本材料学会，pp.164-169，1985.
- 8) 佐佐木綱・秋山孝正：プロダクションシステムによる交通制御の記述についての検討，第41回 土木学会年次学術講演会講演概要集 4，pp.265-266，1986.
- 9) Takamasa Akiyama and Hitoshi Furuta：An Expert System for Traffic Control，Proc. of International Symposium of Fuzzy Systems and Knowledge Engineering vol.1，pp.198-205，1987.
- 10) 秋山孝正・堀田徹哉：交通制御エキスパートシステムについての考察，土木計画学研究・論文集，No.5，pp.91-98，1987.
- 11) 湯浅太一・萩谷昌己：Common Lisp 入門，岩波書店，1986.
- 12) 阪神高速道路公団・(社)交通工学研究会：阪神高速道路公団の交通渋滞対策に関する調査研究報告書，昭和56年，1981.
- 13) 馬野元秀：あいまいな知識の表現と利用，大阪大学計算機センタニュース，vol.15，No.2，pp.55-65，1985.
- 14) 馬野元秀：ファジィ集合と人工知能，第2回ファジィシステムシンポジウム講演論文

集, pp.74-81, 1986.

- 15) 秋山孝正：都市高速道路の交通制御における知識工学的方法の適用についての研究,
昭和62年度文部省科学研費補助金奨励研究（A）研究成果報告書, 1988.

第5章

高速道路交通情報処理への 知識工学手法の応用についての研究

5-1 概 説	153
5-2 交通情報提供の現状	154
5-3 交通情報提供エキスパートシステムの作成	157
5-3-1 交通情報提供エキスパートシステムの概要	157
5-3-2 システムの全体構成	158
5-3-3 情報提供ルール構成と役割	162
5-3-4 システムの挙動	166
5-4 交通情報提供方法の評価	174
5-4-1 情報提供ルール評価方法	174
5-4-2 情報提供ルールの改良	178
5-4-3 改良ルールの適用結果と比較検討	181
5-4-4 検討結果のまとめ	189
5-5 結 語	190

第5章 高速道路交通情報処理への 知識工学手法の応用についての研究

5-1 概 説

わが国における急激なモータリゼーションの発達は今なお進行しており、著しい自動車交通需要の増加をもたらしている。そして、このような交通需要に対応するための都市間高速道路ネットワークの整備拡充は、都市間の有機的な結合を密接にするという意味から国家的プロジェクトのひとつとなっている。今後も自動車交通の増加は予想されるが、このような自動車交通の隆盛をもたらした主要な要因として、自動車の自由度の大きさが考えられる。すなわち、鉄道、航空機、船舶などの他の交通機関とは異なり、自動車交通は決められたダイヤに拘束されず、時間、目的地、経路などを自由に選択できるという大きな長所を有する。

こうしたことから、高速道路ネットワークの発達に伴って利用者のニーズも多種多様なものとなっている。一般に都市間あるいは都市内の高速道路においては、利用者サービスの一つとして道路情報板、あるいは路側ラジオ放送などの通信技術を用いて道路交通情報の提供を行っている。これらは、より有効な情報の効率的な提供を目的として行われているものである¹⁾。

一方、情報処理という側面に目を向ければ、コンピュータ技術はこれまで目ざましい発展をとげてきたが、その中でも人工知能研究の実用的な展開が近年脚光をあびている。この一分野として、われわれが通常「知識」と呼んでいる情報を形式化してコンピュータの記憶装置に蓄え、それを問題解決に利用しようとするものがある。この「知識」の貯蔵庫に相当するものを一般に知識ベースといい、このように「知識」をもとにした問題解決を目的とするシステムを「知識ベースシステム」と呼ぶ。またこうした分野の研究は「知識工学」という名称で呼ばれ、現在その各種分野での応用が重要視されている。^{2),3)} このことは第4章においても述べたとおりである。

道路交通情報提供問題は、これまで経験的知識の集積として解決されてきた。しかし現在用いられている情報提供システムにおいては、情報処理に対する特定の判断プロセスを

持ち自動的に伝達するための機能は具備されているが、新しい「知識」を導入したり、あるいは「知識」そのものを明示的に表現しているものとはいえない。

ここでは、道路交通情報提供問題を「知識ベース」として表現し、交通情報の提供を目的とした情報処理システムを構築することを目的としている。このような知識ベースシステムは、専門的知識を導入しているところから一般にエキスパートシステムと呼ばれるが、この情報提供エキスパートシステムが開発されれば、現実問題としての交通情報処理を円滑に行い、またこれまで蓄積された知識ベースを改良することで、その情報処理機能の向上をはかることが可能となる。

本章の研究では、以上のような最終目的への初期段階として研究を行う。まず5-2で本研究の対象となる交通情報提供問題について述べ、エキスパートシステムの概念とその適用可能性を示す。次に5-3で実際の情報提供エキスパートシステムを作成しその概要を説明する。さらに5-4においてこのシステムを用いた情報提供方法の改良とその評価の可能性を示す。最後に5-5において本研究の問題点と今後の課題を述べ結論とする。

5-2 交通情報提供の現状

ここでは、本研究の対象である道路交通情報提供の現状について検討する。

一般に、道路交通情報の提供は情報収集、情報処理、情報提供の3つの作業により実現され、都市間高速道路を例に取れば、その概要は図5-1に示すとおりである。^{4),5)}

道路交通情報提供で扱う情報には、大きく分けて、「事故・故障・渋滞情報」「工事情報」「気象情報」「トンネル情報」「他機関からの情報」の5種類を主要なものと考えることができる。これらの情報の収集は路線の管制を行う管制室によって行われる。収集の方法としては本図で示したように各種の検知器や、巡回パトロールカーからの連絡、利用者からの非常電話連絡、あるいはＩＴＶカメラなどというように各情報により様々な形がある。

一方、情報提供の対象となる情報板には、役割別に「本線情報板」「広域情報板」「入路情報板」「一般路情報板」「気象情報板」「トンネル情報板」の6種類がある。これらについてその特徴を整理したものが表5-1である。そして各々の情報板は、本表からもわかるようにそれぞれ異なった役割りをもち、その目的設置位置に対応した表示項目を持ち、管制室からの遠隔操作により各項目が表示される。ここでは、名神高速道路の大阪管理局管内の

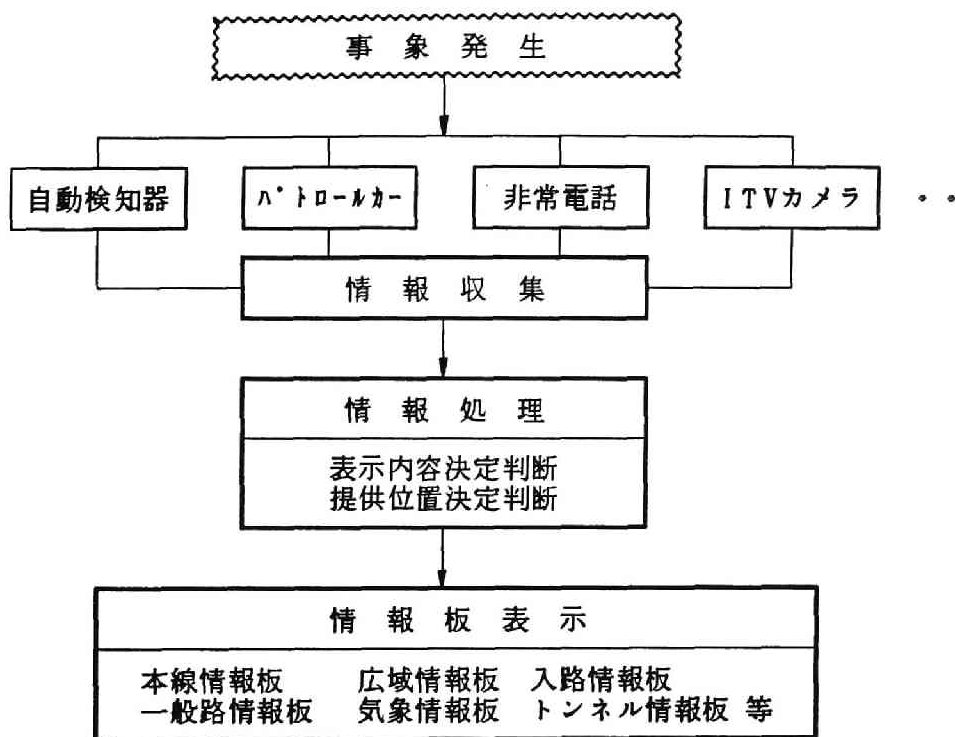


図5-1 交通情報提供の概要

表5-1 情報板の種類とその役割

情報板種別	設置位置	表示範囲	目的及び役割
本線情報板	本線上各I.C.のランプ手前の路肩	近接区間 (2~3)	前方区間の道路情報の提供
広域情報板	本線上I.C.間中央付近	広範囲	詳細かつ広範囲の情報提供及び本線情報板の補完
入路情報板	各I.C.入口のブース上	流入部 近接区間	流入者へ本線上の道路情報の提供
一般路情報板	各I.C.入口付の一般道路上	比較的 広範囲	高速道路を利用するか否かの判断のための情報提供
気象情報板	気象変化の多い地域の本線路肩	特定地域	気象の変化にともなう道路情報の提供
トンネル情報板	トンネル手前の本線路肩	トンネル内	トンネル内の道路状況及び災害状況の情報の提供

吹田ICの上り線に設置されている本線情報板についてその表示項目を表5-2に示す。また実際の本線情報板の表示例を模式的に図5-2に示す。これらをみてもわかるように限定された情報形式によって情報を提供するものである⁶⁾。

交通情報提供においては、以上のように、収集された情報が、各情報板に提供されるわけであるが、情報板への表示が行われる前には、図5-1にあるように管制官の判断により、収集情報に対して、表示内容、提供位置の決定が行われる。

「表示内容の決定」は、先の表示項目を見てもわかるように、現状の情報板では表示項目に限界があり、実際に起こっている事象をそのまま表示できないため、発生事象を表すのに最適な表示項目を選択して表示情報を作成するものである。また「提供位置の決定」では、情報を提供するのに最も効率的な位置にある情報板を選択する。

これらの判断は情報が単独で発生した場合には、さほど問題とならないが、いくつかの事象が同時に発生した場合には、そのすべて

表5-2 情報板の表示項目例

	上 段	下 段	
		左	右
1	吹田-茨木	工事	通行止め
2	茨木-京都南	事故	車線規制
3	吹田-京都南	雨	渋滞中
4	茨木-京都東	ユキ	50%規制
5	茨木から先	凍結	走行注意
6	京都南から先	強風	車有注意
7	京都東から先	故障	物有注意
8	この先	落下	ーン規制
9	ここで出よ	チェ	車作業中
10	茨木出口	低速	アップ注意
11	梶原トンネル	渋滞	8キロ
12	天王山トンネル	渋滞	10キロ
13	近畿道	渋滞	12キロ
14		地震	15キロ
15	消 滅	消 滅	消 滅

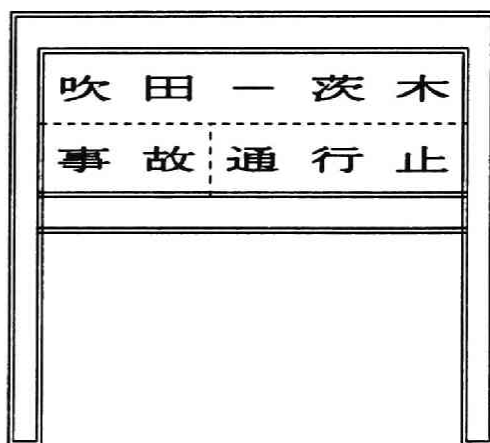


図5-2 本線情報板の表示例

について不都合が生じないような情報提供を考えねばならず、非常に複雑なものとなる。

このため、交通情報提供の現場では、情報提供に関するこれまでの経験の蓄積である「マニュアル」が、管制官の判断を支援している。しかし、人間の情報処理能力には限界があり、管制官自身に対するアンケート調査結果でも、大半が人員不足であるとの意識を持っている。このために実際の情報提供においても的確かつ迅速な情報提供が困難なものとなっているのが現状である。

このような現状を改善するためには、情報収集と、情報提供との間に人間の判断が介在する現在の方式を改め、交通情報提供システム全体としての自動化が必要であるとの意識が高まり、この問題に関する検討が現在進行中である。

本節では、まず知識工学についての基礎的考察と、各専門分野における問題解決を支援するエキスパートシステムの適用可能性を検討し、さらに交通情報提供の現状を示した。

以上の検討から、本研究ではこれまで管制官の経験的、専門的知識により解決されてきた交通情報提供問題の、現状の問題点を改善する手段として、交通情報提供エキスパートシステムの導入を提案する。こうした交通情報提供エキスパートシステムにより、これまでの管制官の判断を代行、または支援することによって、より効率的な情報提供の実現を目指している。

5-3 交通情報提供エキスパートシステムの作成

5-3-1 交通情報提供エキスパートシステムの概要

本研究で作成するエキスパートシステムの概要は、図5-3に示すように交通情報提供に関する知識と発生した交通情報を与えられて、情報板に表示すべき情報を出力するものである。まずモデルとしての前提について以下に述べる。

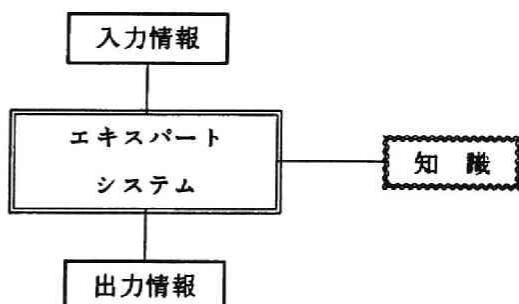


図5-3 交通情報処理エキスパートシステムの概要

(1) 対象路線

一般に交通情報提供は、都市間高速道路だけを対象とするにしても、全国の道路網全体にわたって行われるべきものであるが、実際には情報板の管理運営は、日本道路公団の場合を例にとれば、大阪管理局、名古屋管理局、東京第二管理局、というように各管理局の管内路線を単位として行われている。これは、交通管理運営上必要なことであり、実際の検討を行ううえでも無視しがたい。そこで本研究では、対象路線を、名神高速道路の大阪管理局管内（西宮ー京都東）に限定して交通情報提供問題のモデル化をおこなう⁷⁾。

(2) 対象情報板

5-3-2 システムの全体構成

本研究で作成するエキスパートシステムは、図5-5に示すように大きく分けて、知識ベース、推論ベース、及び入出力部の3つの部分で構成される。この点は第4章で述べたものと同様であるが、ここでは情報提供のシステムとしての各々の役割について以下に説明する。^{8),9)}

(1) 知識ベース

知識ベースは、エキスパートシステムが行う推論の基礎になる知識を蓄えておくところである。本システムでは、交通情報提供問題用ルール群よりなる「ルールベース」、推論過程で用いる各種のデータを蓄えておく「データベース」(ワーキングメモリともいう)に分かれる。

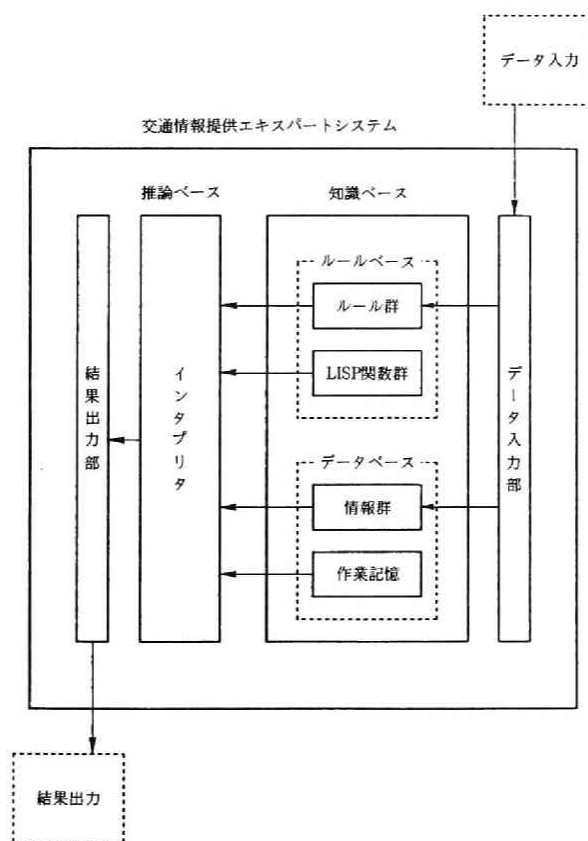


図5-5 交通情報提供エキスパートシステム構成図

ルールベースには、さらに「IF-THEN」形式で表されるプロダクションルール群と、LISP関数群とがある。前者は問題解決に必要な知識のうち、提供情報決定方式等の高度に専門的な知識をプロダクションルールとして表現したものであり、ここに専門家知識が含まれていると考えることができる。後者は距離計算、優先度計算等の比較的単純で、提供情報決定方式についての判断を変更しても変化することのない本問題に固有の「基礎的知識」を表わしたものである。したがってこの部分は、プロダクションルールとしてではなく、直接LISP言語を用いてシステムの内部関数として定義されている。このLISP関数群に保存されている基礎知識は、いわば知識を用いるための知識であり、知識工学においては「メタ知識」と呼ばれるものである。システム内に交通情報提供問題を解くための「メタ知識」を与えたことにより、ルールの作成が非常に容易なものとなった。

またデータベースは、推論の対象である入力情報群と、推論過程における作業状態を蓄えておく作業記憶で構成される。すなわち、データベースでは、交通情報提供のための推論プロセスにおいて随時データの変更がなされることになる。この部分はエキスパートシステムでは内部記憶となるので利用者にはとくに関係しておらず、入出力部においてデータ変換が行われてはじめて意味のある形の情報となる。

(2) 推論ベース

推論ベースは一般に「インタプリタ」と呼ばれ、ルールと作業記憶をマッチングさせて、条件の成立したルールを実行するシステムの中核部分である。本システムのインタプリタは、第5章の基本エキスパートシステムの推論部を参考として作成されているが、構造は若干複雑になっている。図5-6に示すように、大きく3つの部分に分かれる。

一つは「ルール文法変換部」である。エキスパートシステムの最大の長所はルールがシステムと独立して保存されており、その作成、

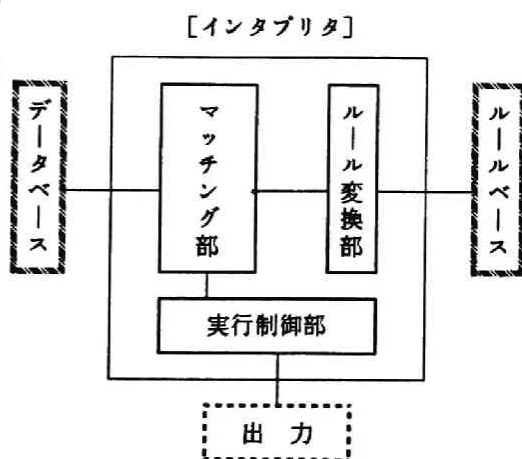


図5-6 インタプリタの構成図

変更、その他が容易な点であるが、このためにはルールがシステムの記述言語の文法に左右されない独自の簡単な文法で書けることが不可欠である。

本システムにおいてもルールの記述は、システムの記述言語であるLISPの文法¹⁰⁾とは異なった形式をしているので、インタプリタが「IF-THEN」形式のルールを直接処理することはできない。このためルールに記述された内容を、インタプリタの理解できるLISPの文法に変換するのが「ルール文法変換部」の働きである。

いま一つは「マッチング部」で、データベースの内容とルールの条件部とをマッチングし、条件の成立したルールを実行する部分である。この「マッチング部」は、推論を進めるうえで極めて重要なプログラムである。本システムはルールの先頭から順にマッチングを行い、条件部に書かれた内容が全て成立した最初のルールを実行するマッチング法を採用した。また作業記憶の状態によっては、複数のルールが成立する可能性があるが、この場合には最初にマッチングしたルールを実行することになるいわゆる“ファーストマッチング”の方法を用いた。この意味でルールの順序によって推論手順そのものが変化するものとなっている³⁾。

最後にこの「パターンマッチング」→「ルールによる推論実行」のサイクルを制御しているトップレベルのプログラムとして「実行制御部」がある。本研究における推論ではバックトラックなどの複雑な推論は用いてないが、今後推論プロセスの改良を考えるうえでは重要である。

(3) 入出力部

入出力部は、システムと外部との間に位置し、システムの利用を容易にするための独立したプログラム部分である。これらのプログラムは、一般にプログラムの単位という意味で「モジュール」と呼ばれ、システム全体にとっては付属的な役割を持つ。しかしこれらは、エキスパートシステムと利用者との唯一の接点であり、利用者にはシステムの使いやすさを決定する重要な意味を持つ。入出力部には「インプットモジュール」と「アウトプットモジュール」の2つがある。

「インプットモジュール」は、2つのサブモジュールから形成されている。これらはシステムに発生事象の入力を行う「データインプットモジュール」と外部ファイルとして蓄えられたルール群を記述上の簡単な誤りを適宜修正しながら「ルールベース」としてイン

タブリタの管轄下に確保する「ルールベースモジュール」である。

エキスパートシステムではルールを推論の基礎となる一種のデータとして処理するが、「ルールベースモジュール」は、このルールというデータを読み込むためのプログラムと考えることができる。「データインプットモジュール」が、入力された事象をシステムが利用するデータとして情報群に変換して蓄えるのに対して、「アウトプットモジュール」は選択された情報を情報板の表示形式に合う表示項目に変換して出力する。

本エキスパートシステムは基本的に「情報選択システム」とでもいうべきもので、入力される情報と出力される情報は、交通事象のひとつを表現したものとしては、ほとんど差異がない。しかし、実際には入力される情報群とシステム内部で取り扱う情報群、あるいは結論として出力された情報群とは同じ「情報」といっても、性質の全く異なるものである。

入力される時点では、それは道路上で発生した「事象」を表す要素としての断片的な「情報」であり、それがシステム内部で取り扱われる場合は推論に用いるデータ（内部記憶）としての「情報」であり、さらに推論の結果として出力される際には情報板の表示項目としての「情報」である。したがって最終的な出力は、提供の位置、文字数、情報の組合せなどの意味をもった「情報」となっているのである。

したがって、いずれも同様に交通状態を記述したものであるが、使われている場面に応じて「情報」の形を変換、あるいは意味、要素を結合することは必要かつ重要なことである。この意味においても、入出力部の「モジュール」の働きは、単に入力・出力のための付属部分としてだけでなく、システムにとって本質的な意味をもっている。

5-3-3 情報提供ルールの構成と役割

前項でシステムの全体構成について検討したが、ここでは推論のための具体的なルール構成とその役割についてのべる。

本システムのルールは、「情報提供作業管理ルール」と「提供情報決定ルール」の2つによる階層構造をなしており、この概要を図5-7に示す。一般にプロダクションシステムの欠点として、すでに示したようにルールの増大にともなう大幅な実行速度の増加、あるいはルールの複雑化による、ルール全体像の不明確化があげられる。本システムで行っているようなルールの分割は、以上の問題点を回避するために有効な方法である。すなわ

ち全体の推論をいくつかの段階に分けて考えることができる時、推論の段階（深さ）ごとにルール群を分割し、推論ステップの進展にともなって必要なルール群のみを用いるということである。

次に各々のルール群を詳細に検討する。まず、「作業管理ルール」はさらに「作業終了判断部」と「対象情報板・採用ルール決定部」(情報板・ルール決定部)の2つに分かれる。前者は、提供情報決定推論が全情報板について完了したかを判断して、情報提供全体の作業の開始や終了を管理するためのルールである。また後者は、提供情報決定推論に先立って、推論の対象となる情報板を決定し、距離判断の基準となる情報の提供位置をシステム内部に入力するとともに、採用する「提供情報決定ルール」を選択して提供情報決定推論を開始するものである。

「作業管理ルール」の役割である情報提供のための全体作業の概略的な処理フローと各作業を受け持つルールの対応を図5-8に示す。このフローにしたがって、本研究で対象とする情報板の初期位置である、上り尼崎に設置されている本線情報板から上りの豊中・吹田、…、京都東・下りの京都東・京都南、…、尼崎まで上下線別に12箇所の本線情報板について、提供情報の決定を行ったのち2箇所の広域情報板についても同様に処理される。

「提供情報決定ルール」は、各情報板に対して、入力情報群から提供すべき情報を選択するルールで本問題解決のための本来の知識である提供情報決定方式をルール化したものである。これは、すでに図5-7に示したように「距離判断部」「優先度判断部」及びそれらを総合して最終的に提供情報を決定する「提供情報決定部」の3つで構成され、提供情報の決定は、事象の優先度と提供位置から事象発生区間までの区間数（距離）の2つの要素の総合判断にもとづいてなされる。

現在この「提供情報決定ルール」には、いくつかの異なる方式のルールを保存しておくことが可能であり、「対象情報板・採用ルール決定部」で、このうちのどのルールを採用するかを指定できるようになっている。

本線情報板及び広域情報板に対する基本的な提供情報決定フローをそれぞれ図5-9および図5-10に示す。これらを簡単に説明すると、本線情報板については、次区間の事象を最優先とし、次区間に事象が発生していない場合、優先度のある程度高いもの（ランク3以上）については3区間先まで情報を提供を検討するというものである。

◎ 情報提供作業管理ルール

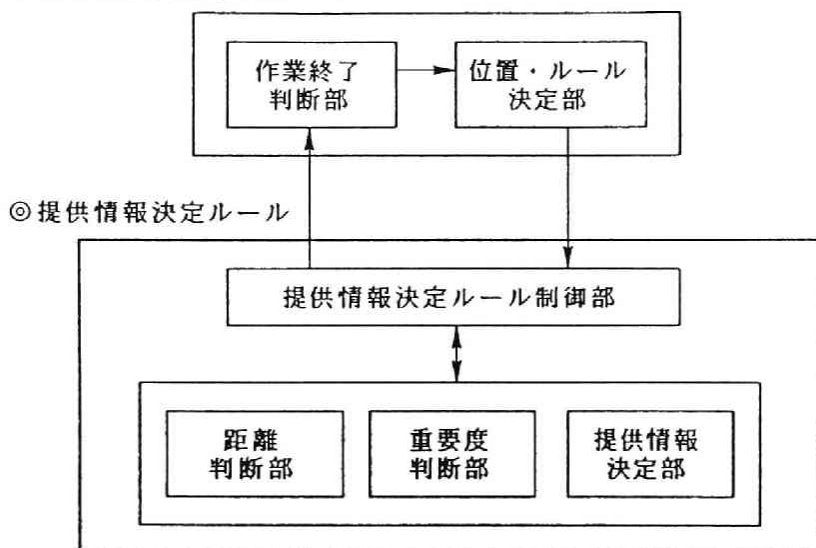


図5-7 情報提供用ルール構成図

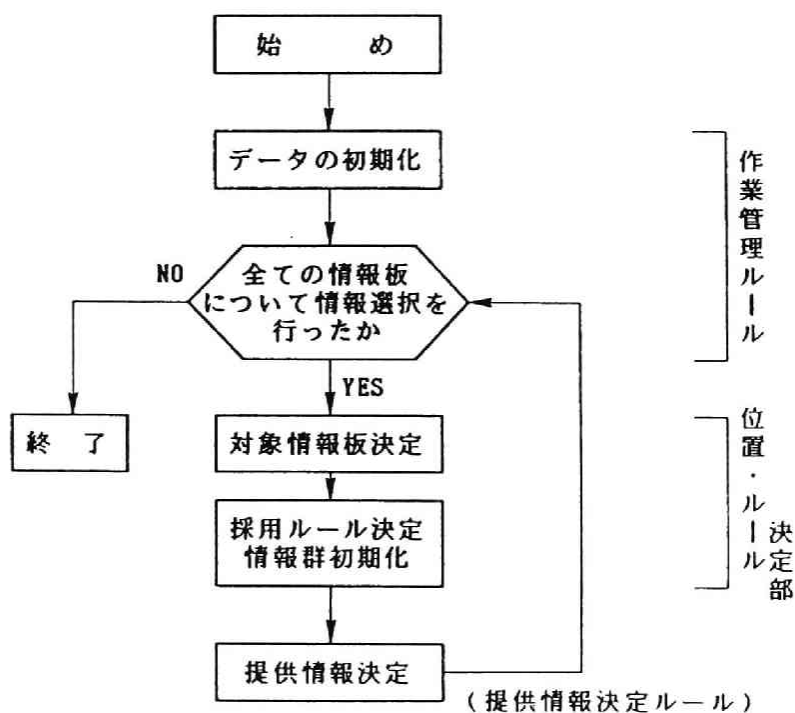


図5-8 システム全体の実行フロー

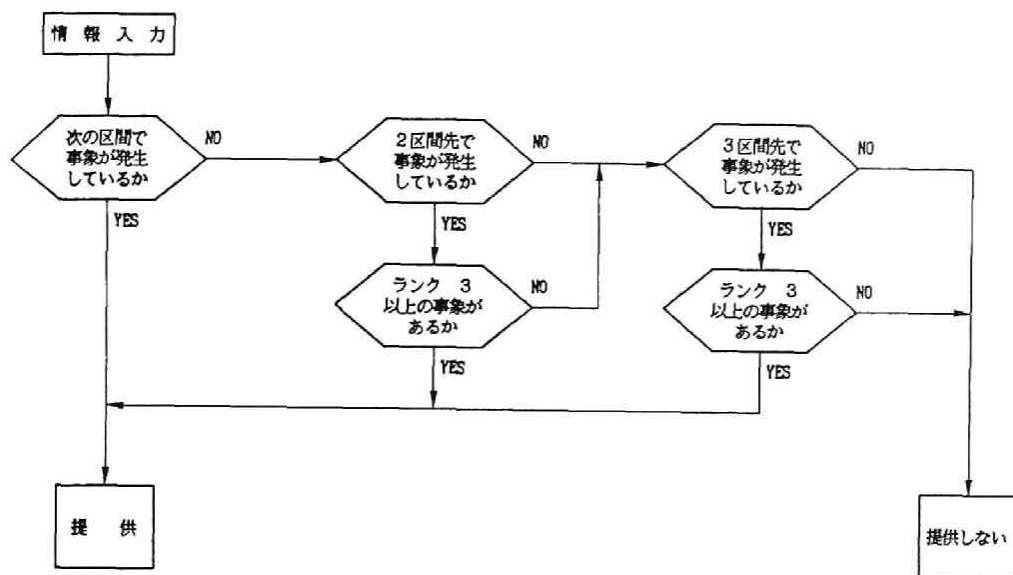


図 5-9 本線情報板の提供情報決定ルールのフロー

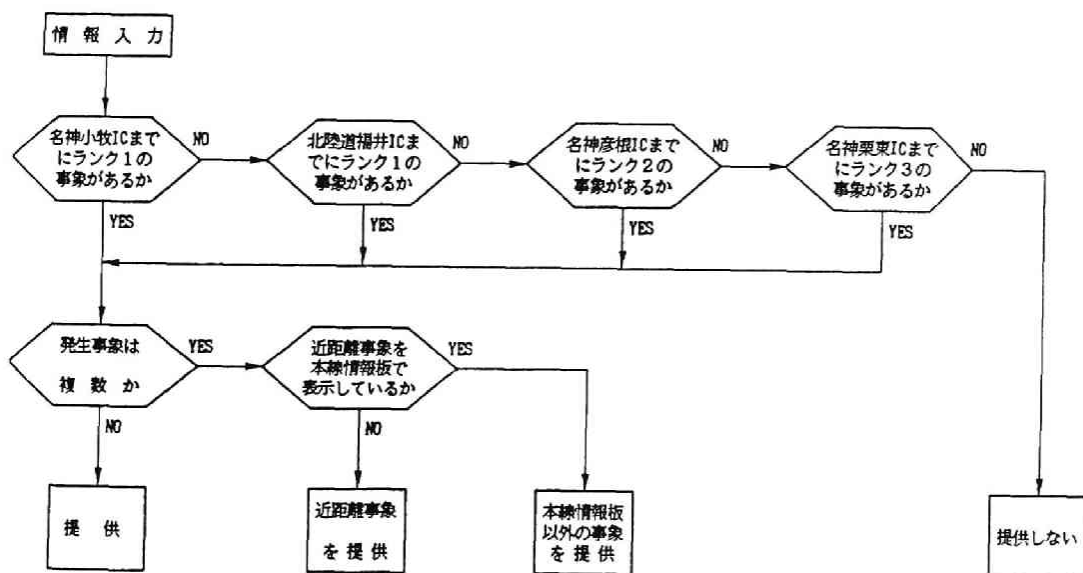


図 5-10 広域情報板の提供情報決定ルールのフロー

また、広域情報板については、事象のランクによる情報選択を優先し、ランク1の事象については名神小牧ICまでと北陸道福井ICまでの情報を提供する。それらの区間にランク1の事象がない場合、ランク2の事象について名神彦根ICまで、ランク3の事象に

について名神栗東ICまで情報提供を行うものである。判断のもとになる優先度（ランク）と発生事象の対応を表5-3に示す。この表によって高速道路上で発生する事象がウエイトづけされていることになる。

5-3-4 システムの挙動

ここでは構築されたシステムの実際の動きについて検討する。具体的には、次のような事象が同時に発生した場合を想定して、事象入力から表示項目決定までのシステムの実際の動きについて説明する。

事象1： 上り線 尼崎-豊中 事故のため4キロ渋滞

事象2： 上り線 茨木-京都南 雪によるチェーン規制

事象3： 下り線 茨木-吹田 工事による車線規制

事象4： 上り線 瀬田西-栗東 事故のため通行止め

本例はかならずしも、上記のような交通状況が高い頻度で生ずるというものではない。したがって若干非現実的な事象の組合せとなっている部分もあるが、逆に多種多様な情報処理を考えてこれを例としたものである。

(1) システムの起動

本エキスパートシステムはLISP言語を用いて構築されている。実際のプログラムはNEC PC-9801シリーズ上で動くGCLISPによって記述されている。システムの起動は以下の手順による。

まずGCLISPを起動し、LISPで書かれた推論ベース・各種モジュールを読み込む。次に、具体的な交通情報提供問題解決の知識すなわち知識ベースを与える。

以上で交通情報提供エキスパートシステムとしての準備が完了する。こののち、実際の発生情報を入力することにより、提供情報決

表5-3 発生事象のランク

事 象	ランク	分類基準
通行止 チェーン規制	①	不通 条件付き通行
15kmを越える 渋 滞	②	旅行時間の 大幅増加
車 線 規 制 15km未満の 渋 滞	③	十分な注意必要 旅行時間の 若干増
走行注意 50キロ規制 スリップ注意	④	注意程度で 走行可能

定を行うことができる。

（２）事象の入力

提供情報決定推論の実行に先立って、５－３－２で述べた「インプットモジュール」を起動して発生事象の入力を行う。ここでは、事象１を入力する際のキーボード入力と画面表示を図５－１１に示す。

この入力方法を簡単に説明すると、まずL I S P関数（information）を呼び出しインプットモジュールを起動し、続いて発生位置・事象の種類・原因の順にシステムの問い合わせに対して数字で指定することにより、システム内の「インプットモジュール」が事象の各要素をつなぎ合わせた形の情報に変換し格納する。事象２、事象３、事象４についても同様に入力することにより、推論の対象となる交通事故に関する「情報群」が「データベース」内に格納される。

（３）推論の実行

上の例について、実際の推論を実行と、結果出力の様子を表したのが図５－１２である。まず作業記憶入力関数（database）により作業記憶に初期値を与え、続いてインタプリタのトップレベル関数（start）を呼び出してインタプリタを起動し推論を実行して図のような出力を得る。

ここでは、実際の推論がどのようにして行われるかを説明するために、提供情報決定推論の最初の対象情報板である上り線尼崎の本線情報板に対する推論プロセス注目して、推論における各過程でマッチしたルールと作業記憶の変化を図５－１３に示している。以下では本図にそって、各段階でマッチしたルールによりどのような推論が行われたかを示し、本システム内部の推論過程について説明する。なお（ ）内は作業状態を示す。なおここで用いたルールの実際のL I S Pによる内部表現とその意味について表５－４にまとめている。

S T E P－１ ルール１がマッチしてシステムの環境を初期化し作業を開始する。ここで
ルールの条件 a というのは、情報板の種類（a：本線情報板）をあらわしている（作業開始）

S T E P－２ 作業状態を対象情報板の初期位置決定に移す。（初期対象情報板決定）

キーボード入力	ディスプレイの画面表示
(information)	<p>*名神高速道路 西宮 - 京都東 間 → 1 京都東 - 小牧 間 → 2 *北陸自動車道 米原 - 福井 間 → 3 *中国自動車道 吹田 より 先 → 4</p> <p>どの路線ですか？ 1</p>
1	<p>上り線 → 1 ・ 下り線 → 2</p> <p>上下どちらの線の事象ですか？ 1</p>
1	<p>西宮 ① --- ② --- ③ --- ④ --- ⑤ --- ⑥ --- ⑦ --- 京都南 京都東</p> <p>どこの区間で発生した事象ですか？ 区間の始点と終点の番号をインプットして下さい。 2 3</p>
2	<p>通行止め → 1 渋滞 (15km未満) → 5 チューン規制 → 2 走行注意 → 6 渋滞 (15km以上) → 3 50キロ規制 → 7 車線規制 → 4 スリップ注意 → 8</p> <p>事象はどれですか？ 5</p>
3	
5	<p>渋滞長を入力して下さい (キロメートル) 4</p>
4	<p>事故 → 1 霧 → 5 地震 → 9 工事 → 2 風 → 6 凍結 → 10 雨 → 3 落下物 → 7 自然発生 → 11 雪 → 4 火災 → 8 低速車作業 → 12</p> <p>原因は何ですか？ 1</p>
1	<p>*データ入力はこれで終わります。</p> <p>名神 上り 西宮-豊中 間 事故 渋滞 (4km)</p> <p>これでよろしいですか？ y</p>
Y CR	END

図5-11 入力状況と画面表示

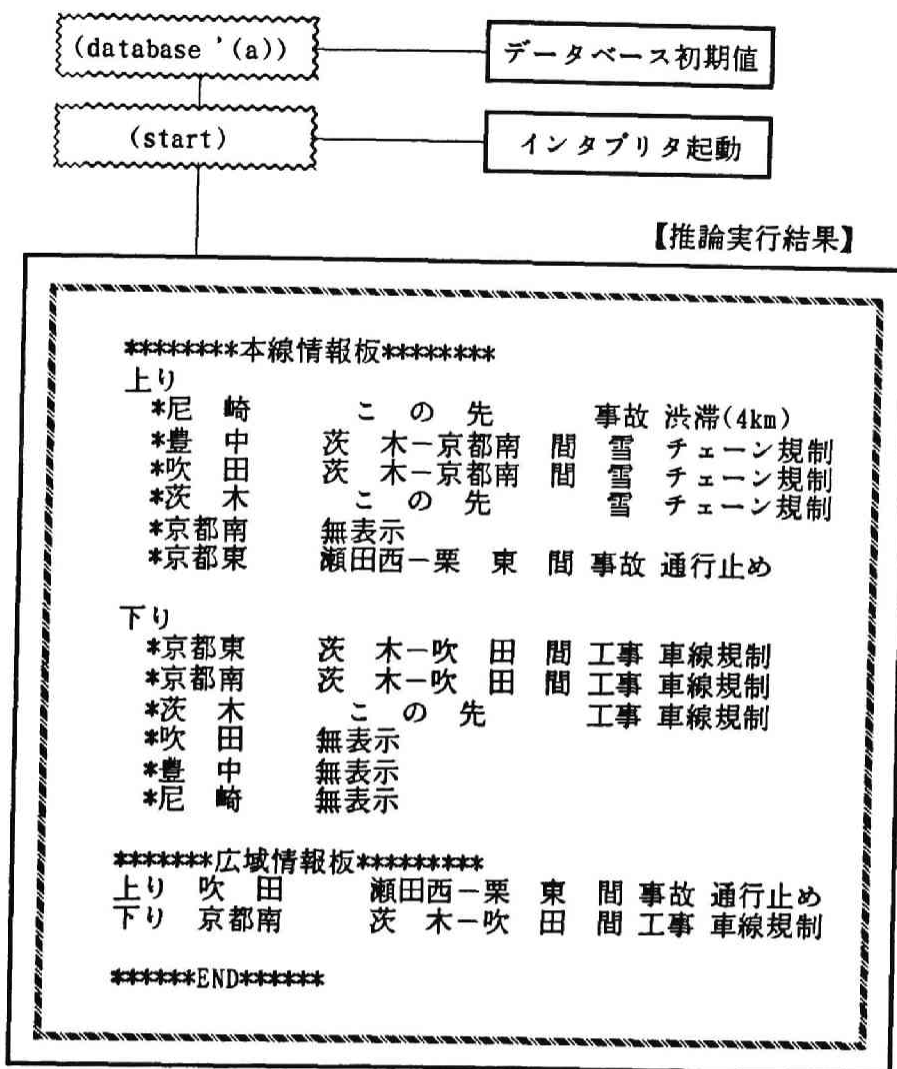


図 5-12 推論の実行と出力結果

STEP-3 対象情報板を上り尼崎と決定し処理を提供情報決定用ルールに受渡し情報提供の推論を開始する。(推論開始)

ここまでで作業管理ルールによる推論は一旦終り、続いて提供情報決定ルールによって情報選択の推論が行われる。

STEP-4 距離による情報選択を行う。(距離判断)

STEP-5 本例題では、現在の対象情報板である上り尼崎の次の区間である尼崎ー豊

作業記憶の変化フロー

実行されたルール

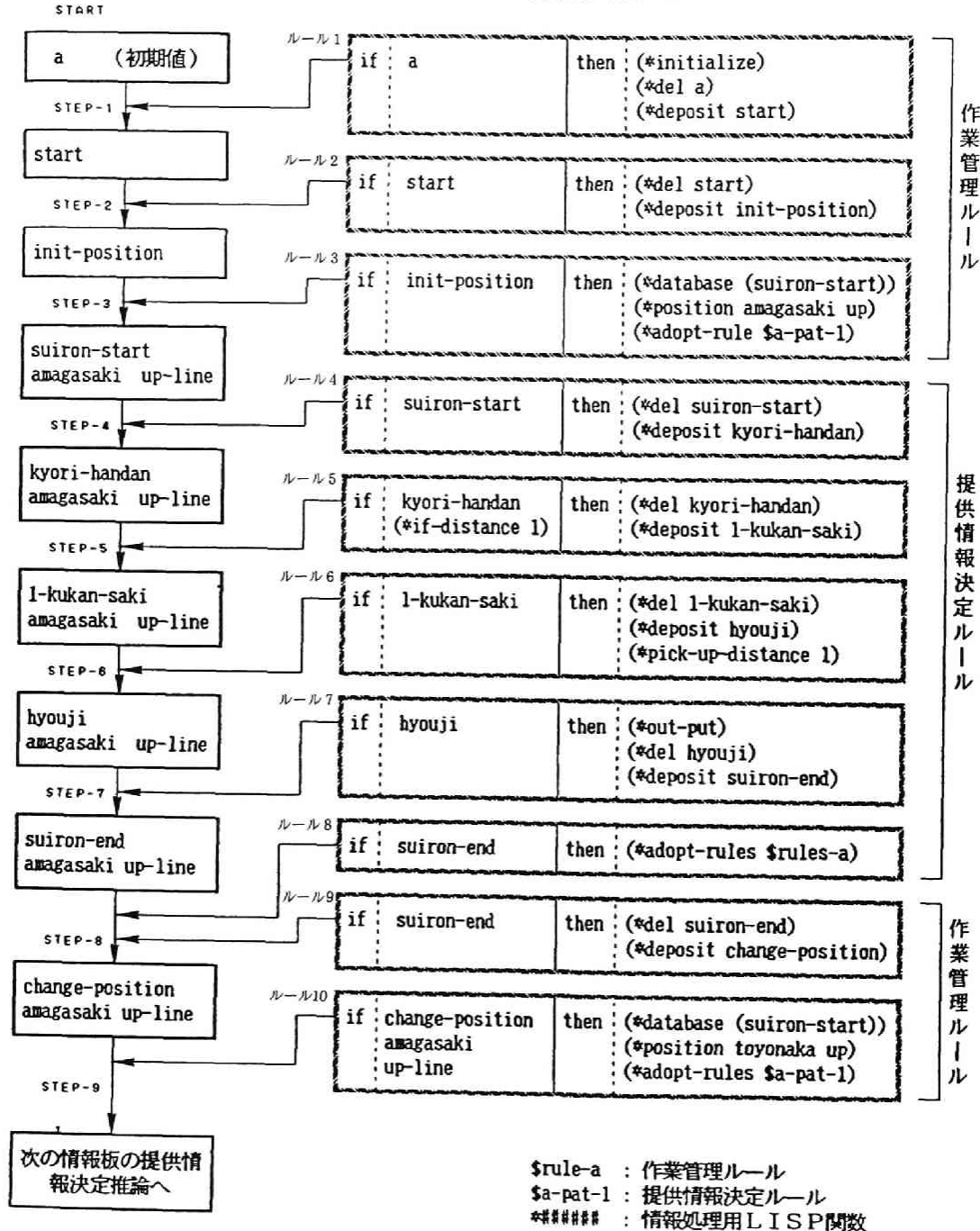


図5-13 尼崎・本線情報板における推論経路

表5-4 L I S Pによるルール表現

	ルールの実際の記述			表現内容
1	if a	then	(*initialize) (*del a) (*deposit start)	もし (初期値) であれば データを初期化し 「作業を開始」
2	if start	then	(*del start) (*deposit init-position)	もし 「作業開始」 なら 「最初の情報板を決定」
3	if init-position	then	(*database (suiron-start)) (*position amagasaki up) (*adopt-rule \$a-pat-1)	もし 「初期情報板決定」 なら 上り・尼崎について ルール1により 「推論を開始」
4	if suiron-start	then	(*del suiron-start) (*deposit kyori-handan)	もし 「推論開始」 なら 「距離判断」
5	if kyori-handan (*if-distance 1)	then	(*del kyori-handan) (*deposit l-kukan-saki)	もし 「距離判断」 次区間で事象発生 なら 「1区間先に事象有り」
6	if l-kukan-saki	then	(*del l-kukan-saki) (*pick-up-distance 1) (*deposit hyouji)	もし 「1区間先に事象有り」 なら 1区間先の事象を選択し 「表示」
7	if hyouji	then	(*out-put) (*del hyouji) (*deposit suiron-end)	もし 「表示する」 なら アウトプットモジュールを起動して 項目を出力し 「推論を終了」
8	if suiron-end	then	(*adopt-rules \$rules-a)	作業管理ルールを採用する。
9	if suiron-end	then	(*del suiron-end) (*deposit change-position)	もし 「推論終了」 なら 「対象情報板の変更」
10	if change-position amagasaki up-line	then	(*database (suiron-start)) (*position toyonaka up) (*adopt-rules \$a-pat-1)	もし 「上り・尼崎 終了」 なら 上り・豊中に変更し ルール1により 「推論を開始」

STEP-6 1区間先で事象が発生しているので、作業状態を「表示」とする。(表示)

STEP-7 関数 (out-put) により「アウトプットモジュール」を起動して表示項目を出力し、提供情報決定のための推論を終える。(推論終了)

STEP-8 上り尼崎の情報板について情報選択を終了したので処理を作業管理ルールに戻す。ここで、この地点に関する判断は終了したことになる。

以下の段階は作業管理ルールによる推論である。

STEP-9 ひとつの情報板について推論が終了したので、対象情報板を変更する。

(対象情報板変更)

STEP-10 先ほどまで対象としていた情報板の位置が、上り尼崎であったので、対象情報板の位置を上り線・豊中とし、情報選択推論を開始する。(推論開始)

ここまでが一つの情報板に対する提供情報決定の1サイクルである。推論過程における各ステップはプロダクションシステムの推論の1サイクルに相当する。

この先も同様に、「対象情報板変更」→「提供情報決定」の推論を繰り返し最終的に全ての情報板について提供すべき情報を得ることになる。

ここでは、以上に示した事象例の他に3種類の事象例について推論を実行した。この実行結果を図5-14～図5-16に示す。(実行例1)は冬季の天候の変化を対象としたものであり、(実行例2)は事故等の偶発的事象のある場合である。(実行例3)は事故・天候などが混在して多数の事象が混在した場合である。

いずれのケースにおいても判断に対する妥当な結果が得られており、この意味で「知識ベース」は本来の機能を果しているといえる。

本節では、都市間高速道路において、行われている情報提供に対して、これまでの知識を利用した問題解決のためのエキスパートシステムを作成した。実際の具体的な検討から以下のことが整理された。

①情報提供に用いるためのエキスパートシステムとして、モデルの全体構成を具体的に検討するとともに、各部分についての役割を明確にした。

【入力情報】

事象1	上り	京都	京都	南都	京都	東都	間津	降雪	降雪	による	による	走行	通行	注意
事象2	上り	京都	京都	南都	京都	東都	間津	降雪	降雪	による	による	走行	通行	注意
事象3	下り	京都	京都	南都	京都	東都	間津	降雪	降雪	による	による	走行	通行	注意

【推論結果】

*****本線情報板*****

上り

崎中田木南東
都都都都都

表示示大先
表表表一のの
無無無東ここ

津間

雪雪雪雪

通行止め
行注止
行注止
走注止
通注止

下り

東南木田中崎
都都都都都

示吹吹先示
表一の表表
無中こ無無

田間

事故故
事事事

渋渋渋(5km)
渋渋渋(5km)
渋渋渋(5km)

*****広域情報板*****

上下り

吹田南
京都都

大豊一
東田一

津間

雪事故

通行止め
行渋滞(5km)

*****END*****

制意	規注	線行	車走中	業	りり作	よ有が	に物車	故下速	事落低	間間間	田東木	吹京茂	一ー一	中南南	豊京京	りりり	上上下下	象象象	123	事
----	----	----	-----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	---

[illegible]

【入力情報】

[illegible][illegible]

-173-

②ここではルールという形でこれまでの知識が保存され、これがシステムでの推論内容を決定する。実際のシステムの挙動を例をもって示し、比較的使用性の高いシステムが構築された。

5-4 交通情報提供方法の評価

前節においては、交通情報提供エキスパートシステムを構築した。ここではこのエキスパートシステムの実際の交通情報提供への適用を検討すが、これは本システムが採用している交通情報提供方式を表すルールの妥当性の検討によって確認することができる。ここで用いたルールは現行の検討された結果である基本的な交通情報提供方式を直接ルール化したものであり、この意味では実用性がすでに検討されたものである。

しかしエキスパートシステムの最大の利点はルールを容易に変更できることであり、この長所を生かしてルールを改良し、より適用性のあるルールの開発を考えていくことである。そして本システムを用いることで改良されたルールが提示できれば、より効率的で有効な情報提供を実現することができることになる。

この際交通情報提供問題をエキスパートシステムとしてモデル化し得た背景には、交通情報提供方式自身が、これまでの経験的な知識の蓄積と情報提供に対する専門家の意見によって体系化されてきたという点を認識する必要がある。本研究におけるルールの改良にあたっては、必ずしも真のエキスパートの意見を取り入れたルール化を行うことはできないが、ヒューリスティックアプローチを取り入れ、いくつかの改良案を比較検討し、その結果をさらに次の改良へフィードバックしていくという帰納的な方法を取る。

以上のようなことを考慮して、まず複数のルールを比較検討するための評価指標をいくつか提案し、続いて3種類のルールの改良案を示す。そしてさらにこれらの評価指標によりルールを比較検討して、本システムの交通情報提供問題への適用について考察する。

5-4-1 情報提供ルールの評価方法

情報提供ルールの良否を評価する際には、そのルール群を基にした推論によって導き出された結論である提供情報群の有効性を考えることになる。本研究ではその方法として、具体的な評価基準を「情報提供の有無についての評価」と「提供内容についての評価」に分けて考える。

前者は、内容の是非にかかわらず、「情報提供」の行為自体に情報量を増加させるというサービスを与えたという意味があるという考え方に基づいている。具体的には、何か所の情報板で情報提供を行ったか、あるいは入力情報をすべて提供したか等を評価するものである。

これに対して後者は、提供された情報の質に重点をおいた考え方であり、提供された情報の内容の妥当性を考慮した評価を行うものである。

以上の2種類の評価視点からその具体的な評価方法を以下に説明する。

(1) 情報提供の有無についての評価

情報提供の有無についての評価方法としては、評価指標として次の2つを設定する。

評価指標1： 「提供情報板数」

評価指標2： 「提供情報数」

「提供情報数」は、何箇所の情報板で情報を提供したかを表す指標であり、「提供情報数」は、全入力情報のうち何項目の情報を提供したかを表す指標である。いずれも情報の量に注目したものであり、多くの情報を与えることができればサービスが向上したものと考えるものである。

(2) 提供情報内容についての評価

情報提供内容の評価においては、まず個々の情報板の提供情報の内容を個別に評価する。ここでは、提供された情報の内容を個別に評価する指標として次の3つを設定する。

評価指標3： 「情報の重要度」

評価指標4： 「情報の有効度」

評価指標5： 「情報の価値」

「情報の重要度」を決定するのは、情報が表している発生事象が利用者に与える影響の大きさである。これは表5-5に示すように、事象の重要な順にランクづけが行われている。

表5-5 事象のランクと重要度

事 象	ランク	分類基準	重要度
通 行 止 チェーン規制	1	不 通 条件付き通行	4
15kmを越える 渋 滞	2	旅行時間の 大幅増加	3
車 線 規 制 15km未満の 渋 滞	3	十分な注意必要 旅行時間の 若干増	2
走 行 注 意 50キロ規制 スリップ注意	4	注意程度で 走行可能	1

ここでは、「重要度」をこのランクにした
がうものとし事象のランクをもとに1から4

までの整数で4段階に設定することにした。本来、事象についてのランキングは、その情報による利用者の行動変化の必要性から決定づけられるものである。たとえば、ある地点より遠方が通行不能あるいはある目的地への到達不可能という事態が発生すれば、利用者は高速道路そのものの利用をとりやめることになる。また逆に、到達不可能でない事象の場合には、速度の低下、安全性の減少といったことはあるが、利用者が大きく交通行動を変化させる必要はないわけである。

ランク値は重要な順となっているので、ここで用いる値は1が最大であるが、重要度では逆に4が最大となっている。

「情報の有効度」は、情報板が設置されているインターチェンジ（IC）を通過した車の台数に占める、その後実際に事象発生区間まで進行した車の台数で表す。情報板設置IC通過者は、その前方区間に関する情報を必要とし、その中で実際に事象発生区間を通行するものは、「情報板によって有益な情報の供給を受けた」と考えることができる。

この意味で「情報の有効度」は、交通需要に占める有効情報の供給の割合と考えることができ、この値が大きいほどより多くの利用者にサービスを提供したといえるだろう。したがってこの「有効度」は、事象の発生した位置にだけ依存する評価指標である。

「有効度」は、次式で表される。

$$P = S/D \quad (5-1)$$

P : 「情報の有効度」

D : 情報板設置IC通過台数

S : 情報板設置ICを通過して事象発生区間を通行した台数

なお以下の計算に用いる D 、 S のそれぞれの実績台数は昭和58年度高速道路起終点調査のデータを集計して求めた。表5-6にその集計結果と区間ごとの「有効度」を示す。

「情報の価値」は、「情報の重要度」と「情報の有効度」を組み合わせた総合評価あり、重要な情報を、多くの人に提供したかどうかを表す指標である。これは次式で表わすことができる。

$$V = R \cdot P \quad (5-2)$$

V : 「情報の価値」

R : 「情報の重要度」

P : 「情報の有効度」

表 5 - 6 情報提供地点通過台数と区間別通行台数および有効度

(昭和58年 高速道路起終点調査より集計)

通行台数
有効度

	西 ← 宮 崎	←--- 経由区間 ---→ 下り 上り		尼 豊 崎 → 中	豊 吹 → 田	吹 茨 → 木	茨 京 → 都 南	京 京 都 → 都 東	京 大 都 → 津	大 瀬 津 → 田 西	瀬 栗 田 → 東	栗 竜 東 → 王
情報提供ICからの区間別通交通量	17129 1.00	(23469) 尼 崎 (19737) ← IC →		16964 1.00	10785 0.64	7571 0.45	5884 0.35	3964 0.23	3674 0.22	3443 0.20	3301 0.19	2633 0.16
	10630 0.72	14713 1.00	(28572) 豊 中 ← IC →	23662 →	15156 1.00	10109 0.67	7651 0.50	4994 0.33	4590 0.30	4240 0.28	3991 0.26	3134 0.21
	7352 0.34	9736 0.45	21760 1.00	(34482) 吹 田 (28122) IC →	21431 1.00	16546 0.77	9737 0.45	8659 0.40	7759 0.36	7151 0.33	5452 0.25	
	5491 0.17	7002 0.22	16029 0.50	32201 1.00	(34425) 茨 木 (41239) ← IC →	34094 1.00	20092 0.59	17752 0.52	16004 0.47	14504 0.43	10839 0.32	
	3536 0.18	4350 0.22	9286 0.46	18678 0.93	20019 1.00	(29887) 京都南 (36382) ← IC →	21432 1.00	18860 0.88	16946 0.79	15311 0.71	11342 0.52	
	3183 0.12	3889 0.15	8070 0.32	16196 0.63	17272 0.68	25522 1.00	(32122) 京都東 (31078) ← IC →	27151 1.00	24016 0.88	21421 0.79	14964 0.55	
	西 ← 宮 崎	尼 豊 崎 → 中	豊 吹 → 田	吹 茨 → 木	茨 京 → 都 南	京 京 都 → 都 東	←--- 経由区間 ---→ 下り 上り		京 大 都 → 津	大 瀬 津 → 田 西	瀬 栗 田 → 東	栗 竜 東 → 王

個々の提供情報の内容に関する評価指標は、以上のとおりである。これらの評価指標を用いることにより、提供された一つの情報について、その内容の評価が行える。これを用いて対象地域の全情報板の提供情報を総合的に評価する際には、各提供情報についての評価値を各々算出し、全評価値としてその合計により提供情報の全体的な評価を行う。また個々の提供情報の代表値としてその平均値により提供情報の内容の総合的な評価を行う。本項で設定した評価指標を表5-7に整理する。ここに示した指標で情報に対する評価をすべておこなうことができるものではないが、これによって多面的な評価が可能となっていると考えられる。

表5-7 評価指標のまとめ

	指標名	評価を行う内容
指標1	提供情報板数	情報の提供を行った情報板数
指標2	提供情報数	提供された情報の種類
指標3	情報の重要度	発生事象の重要性
指標4	情報の有効度	利用者にとって情報が有効な比率
指標5	情報の価値	重要度と有効度の総合評価

5-4-2 情報提供ルールの改良

ここでは5-3で作成したルール群のなかから、特に本線情報板の情報提供に対する基本ルールをいくつかの視点から改良する。そのために、まず基本ルールの問題点を整理して、改良のための基本的方針をたて、それに基づいて改良を行う。

(1) ルール改良の基本方針

基本ルールの情報提供方式は、既に検討したとおりである。この基本ルールにより様々な事象例について実際に情報提供推論を行った結果、改良の対象となる問題点として次の2点が挙げられることが分かった。

- ①たとえば、次区間にランク4、2区間先にランク1の事象が発生しているような場合でも、次区間のランク4の事象が優先的に提供される（次区間の最優先）。②発生事象が1つであっても、事象のランクによっては提供されない場合がある（低ランク事象の無視）。

③情報検討範囲が3区間先までであるため、提供を行わない情報板が多い（中距離事象の情報提供もれ）。

まず①については、本線情報板の目的が、近接区間の情報の提供にあることから次区間を最優先するものだが、重大な事象については、次区間の軽微事象に優先して提供を行うこともひとつの考え方として成立するものといえることからこの点の検討を行う。また②については、広く情報の提供を行うためには、事象がたとえ軽微であっても、発生している以上、他に重大事象がなければ情報を伝えるということがこれを行わないことに比べれば有効であるとの考え方から、情報提供すべきであると考えられる。

また③については、現在は3区間先までの事象について提供を行っているが、そこに発生事象がない場合には、さらにその先の区間の事象についても、ランクしだいでは提供を行うことが考えられる。

以上の検討からルール改良の基本的方針を次のように決定し、この方針にもとづいてルールを改良する。

改良方針1：次区間最優先の提供方式の見直し

改良方針2：他に重要事象のない場合の軽微事象の提供

改良方針3：情報検討範囲の拡張

（2） ルールの改良

ここでは各方針に従って検討された改良ルールを示す。

〔ルール改良案1〕

この改良案は、改良の第一歩として、第3の情報検討範囲の変更は行わず、方針1及び方針2にしたがって改良を行ったものである。このルールの提供方式をフローとして図5-17に示す。ここでは次区間の事象にも他区間同様、優先度の判断を行う。このときこの事象がランク4であればさらに前方区間の重要事象の有無を調べ、重要事象があればそれを提供し、なければ次区間の事象を提供する。

この際、3区間先の事象の優先度判断において、提供をおこなう事象のランクの範囲を、基本ルールのランク3以上からランク2以上と変更したが、これは3区間先の事象の提供条件を厳しくする試みである。

[ルール改良案2]

第2の改良案として、方針2、方針3を採用し図5-18に示すように、次区間優先の提供方式は変更せず、情報検討範囲の見直しを行った。具体的には、基本ルールにおける検討範囲を延長し、ランク1の重大事象については4区間先まで提供を行うものとした。

[ルール改良案3]

改良の最終段階として、図5-19に示すように、情報検討範囲を4区間先までとし、次区間の事象についても優先度判断を行う。このルールは方針1～3の全てを採用し改良を行ったものである。

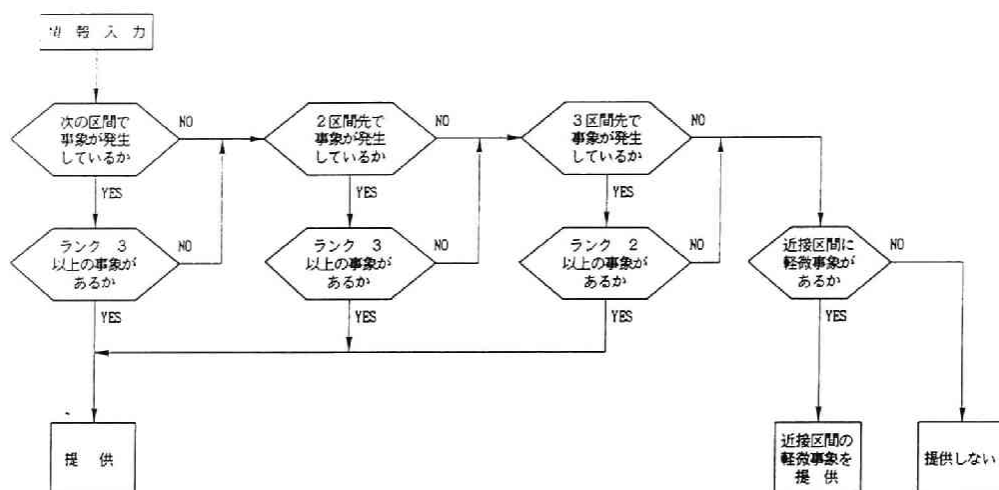


図5-17 ルールの改良案（その1）

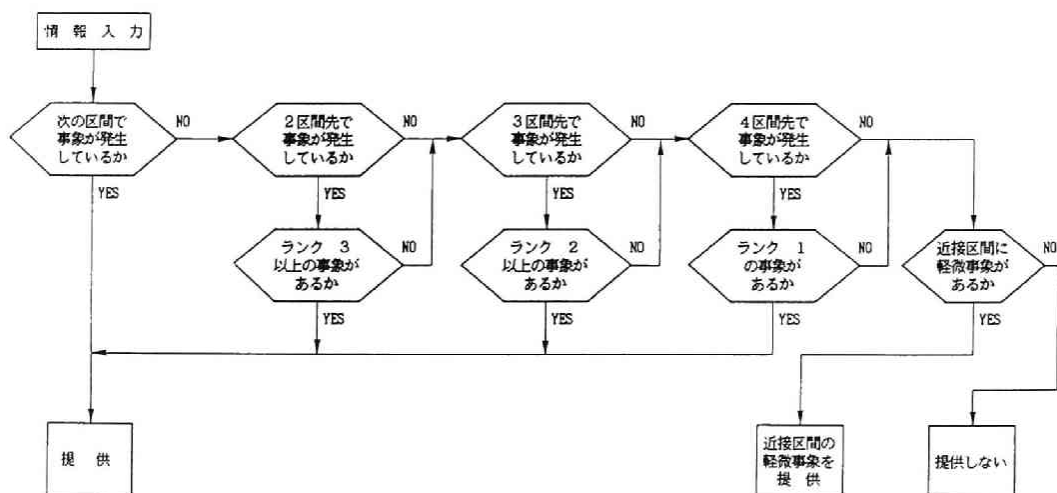


図5-18 ルールの改良案（その2）

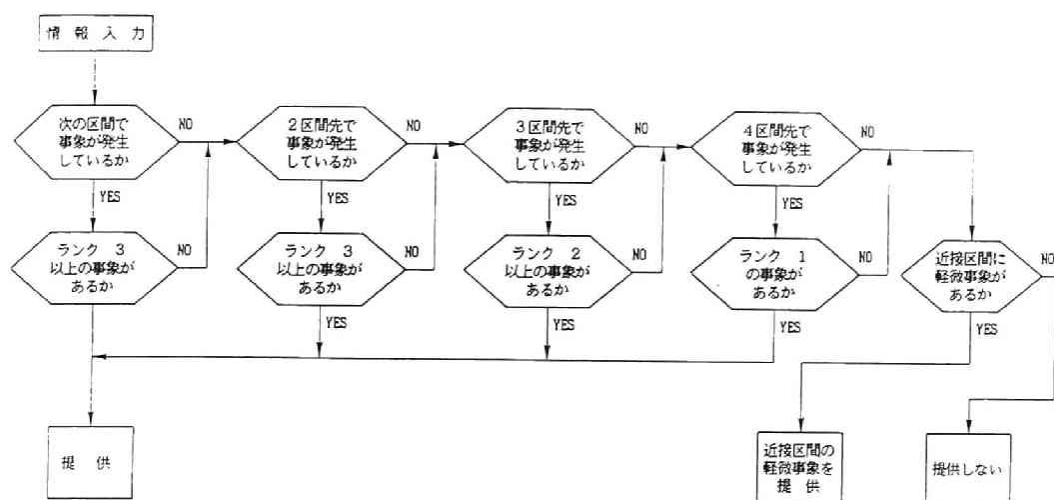


図5-19 ルールの改良案（その3）

以上のように、ルールを改良し3種類の改良案を示した。基本ルール及び3つの改良案の特徴を表5-8にまとめる。ここに示すように基本ルールを「ルール1」とし、内容の変更を行ったものを「ルール2」～「ルール4」と呼ぶことにする。

表5-8 各改良ルール案のまとめ

	ルールの 種類	次区間 最優先	軽微事象 の提供	提供の 範囲
ルール1	基本ルール	○		3区間先
ルール2	改良案1		○	3区間先
ルール3	改良案2	○	○	4区間先
ルール4	改良案3		○	4区間先

5-4-3 改良ルールの適用結果と比較検討

前項までで、交通情報の提供方式を表すルールとして、基本ルールを含めて合計4種類のルールが作成されたことになる。

ここでは5-4-1で設定した5つの評価指標を用いて、これら4種類のルールの比較検討を行う。その具体的な方法としては、表5-9に示すような4とおりの事象例の各々について、各事象が上り線で同時に発生した場合を想定し、各ルールによって得られた結

表 5 - 9 検討する事象例

事象例 1					
茨 木	京都南	間	霧のため	走行注意	
京都東	大 津	間	事故により	通行止め	
事象例 2					
茨 木	京都南	間	雪のため	スリ ップ注意	
京都南	京都東	間	雪のため	50 キロ規制	
京都東	大 津	間	雪のため	チェーン規制	
事象例 3					
吹 田	茨 木	間	雨のため	走行注意	
茨 木	京都南	間	4kmの	自然渋滞	
京都南	京都東	間	落下物有り	走行注意	
京都東	大 津	間	事故により	通行止め	
事象例 4					
吹 田	茨 木	間	事故による10kmの渋滞		
京都東	大 津	間	工事のため	通行止め	

論に対して、先に述べた各評価指標をあてはめ、個々のルールについて総合的な評価を行う。

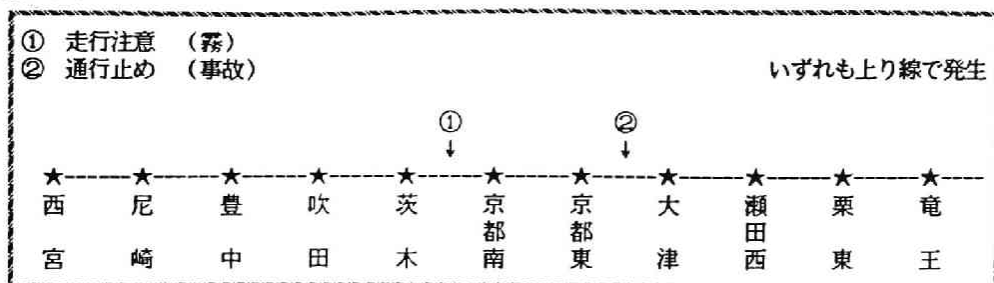
ここでは事象例として、実際に発生しうるいくつかの場合を想定して検討した。（事象例 1）は霧・事故という、気象情報と事故情報のある場合。（事象例 2）は、雪に関する事象であるが、各地点で内容の異なる場合。（事象例 3）は、比較的多くの事象が同時に発生した場合。また（事象例 4）は、天候などの自然状況に対応する事象はなく、人為的な事象である事故・工事が発生した場合である。

事象例別に、4 種類のルールによる推論を実行した結果と、個々の提供情報内容の評価値を図 5 - 20～図 5 - 23に示す。

これらの図からわかるように、事象例 4（図 5 - 23）については、4 つのルールの表示内容及び評価結果がすべて等しくなった。したがってこの例からはルール変更の効果をみることはできない。しかしこれ以外の事象例については、ルール 2～ルール 4 の「全評価値」である評価値の合計が、すべて基本ルールを上回っており、これは全体としてのルールの変更による効果を表すものであるといえる。

ここでは判断の結論に変化のあった事象例 1～事象例 3 について、各ルールごとに個別

発生事象



実行結果と評価値

※採用ルール ルール1

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	無表示			
豊 中	無表示			
吹 田	無表示			
茨 木	①	1	1.00	1.00
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		9	2.88	2.84

※採用ルール ルール2

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	無表示			
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	①	1	0.77	0.77
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		14	3.67	10.87

※採用ルール ルール3

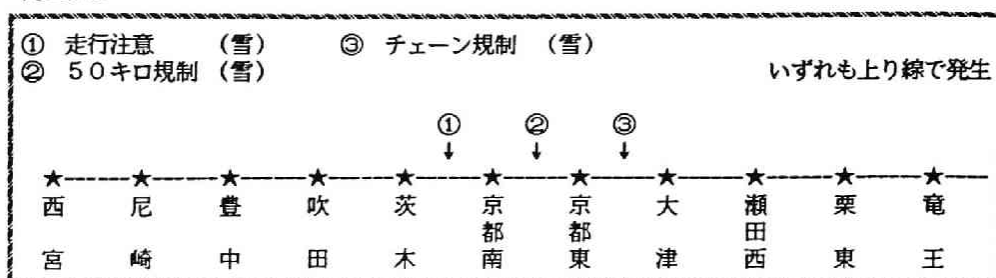
情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.35	0.35
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	②	4	0.40	1.60
茨 木	①	1	1.00	1.00
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		15	4.13	10.97

※採用ルール ルール4

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.35	0.35
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	②	4	0.40	1.60
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		18	3.65	12.05

図 5-20 事象例 1 に対するルール別実行結果

発生事象



実行結果と評価値

※採用ルール ルール1

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	無表示			
豊 中	無表示			
吹 田	無表示			
茨 木	①	1	1.00	1.00
京都南	②	1	1.00	1.00
京都東	③	4	1.00	4.00
評価値合計		6	3.00	6.00

※採用ルール ルール2

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	無表示			
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	①	1	0.77	0.77
茨 木	③	4	0.52	2.08
京都南	③	4	0.88	3.52
京都東	③	4	1.00	4.00
評価値合計		14	3.67	10.87

※採用ルール ルール3

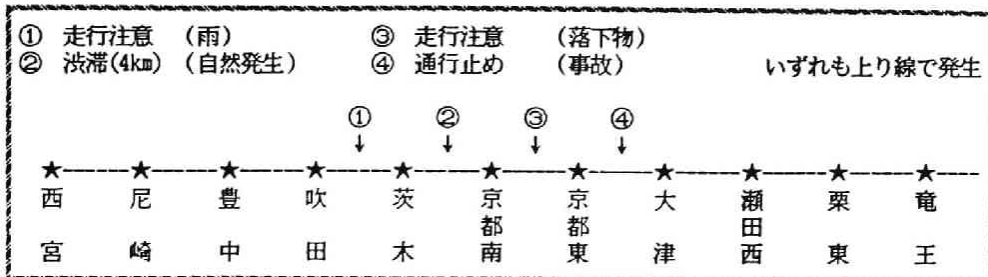
情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.35	0.35
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	③	4	0.40	1.60
茨 木	①	1	1.00	1.00
京都南	②	1	1.00	1.00
京都東	③	4	1.00	4.00
評価値合計		12	4.25	8.45

※採用ルール ルール4

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.35	0.35
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	③	4	0.40	1.60
茨 木	③	4	0.52	2.08
京都南	③	4	0.88	3.52
京都東	③	4	1.00	4.00
評価値合計		18	3.65	12.05

図5-21 事象例2に対するルール別実行結果

発生事象



実行結果と評価値

※採用ルール ルール1

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	無表示			
豊 中	②	2	0.50	1.00
吹 田	①	1	1.00	1.00
茨 木	②	2	1.00	2.00
京都南	③	1	1.00	1.00
京都東	④	4	1.00	4.00
評価値合計		10	4.50	9.00

※採用ルール ルール2

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.45	0.45
豊 中	①	1	0.50	0.50
吹 田	②	2	0.77	1.54
茨 木	②	2	1.00	2.00
京都南	④	4	0.88	3.52
京都東	④	4	1.00	4.00
評価値合計		14	4.77	12.18

※採用ルール ルール3

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.45	0.45
豊 中	①	1	0.67	0.67
吹 田	①	1	1.00	1.00
茨 木	②	2	1.00	2.00
京都南	③	1	1.00	1.00
京都東	④	4	1.00	4.00
評価値合計		10	5.12	9.12

※採用ルール ルール4

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	1	0.45	0.45
豊 中	①	1	0.67	0.67
吹 田	②	2	0.77	1.54
茨 木	②	2	1.00	2.00
京都南	④	4	0.88	3.52
京都東	④	4	1.00	4.00
評価値合計		14	4.77	12.18

図5-22 事象例3に対するルール別実行結果

① 渋滞(10km) (事故)
② 通行止め (工事)

いずれも上り線で発生

★ 西 宮 ★ 新 潟 ★ 豊 中 ★ 吹 田 ★ 茨 木 ★ 京 都 南 ★ 京 都 東 ★ 大 津 ★ 瀬 田 西 ★ 栗 東 ★ 竜 王

※採用ルール ルール1

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	2	0.45	0.90
豊 中	①	2	0.67	1.34
吹 田	①	2	1.00	2.00
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		18	4.52	13.84

※採用ルール ルール2

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	2	0.45	0.90
豊 中	①	2	0.67	1.34
吹 田	①	2	1.00	2.00
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		18	4.52	13.84

※採用ルール ルール3

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	2	0.45	0.90
豊 中	①	2	0.67	1.34
吹 田	①	2	1.00	2.00
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		18	4.52	13.84

※採用ルール ルール4

情報板	表示事象	重要度	有効度	価 値
尼 崎	①	2	0.45	0.90
豊 中	①	2	0.67	1.34
吹 田	①	2	1.00	2.00
茨 木	②	4	0.52	2.08
京都南	②	4	0.88	3.52
京都東	②	4	1.00	4.00
評価値合計		18	4.52	13.84

図5-23 事象例4に対するルール別実行結果

表5-10 事象例1についてのルール別評価

採用ルール	ル-ル1	ル-ル2	ル-ル3	ル-ル4
提供情報板数	3	5	6	6
提供情報数	2	2	2	2
情報の平均重要度	3.00	2.80	2.50	3.00
情報の平均有効度	0.96	0.73	0.69	0.61
提供の平均価値	2.84	2.17	1.83	2.01

表5-11 事象例2についてのルール別評価

採用ルール	ル-ル1	ル-ル2	ル-ル3	ル-ル4
提供情報板数	3	5	6	6
提供情報数	3	2	3	2
情報の平均重要度	2.00	2.80	2.00	3.00
情報の平均有効度	1.00	0.74	0.71	0.61
提供の平均価値	2.00	2.17	1.41	2.01

表5-12 事象例3についてのルール別評価

採用ルール	ル-ル1	ル-ル2	ル-ル3	ル-ル4
提供情報板数	5	6	6	6
提供情報数	4	3	4	3
情報の平均重要度	2.00	2.33	1.67	2.33
情報の平均有効度	0.90	0.80	0.85	0.80
提供の平均価値	1.80	2.03	1.52	2.03

表5-13 事象別評価結果のまとめ

	(事象例1)				(事象例2)				(事象例3)			
採用ルール	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
表示情報板数	×	○	◎	◎	×	○	◎	◎		○	◎	◎
表示情報数					◎	×	◎	×	◎	×	◎	×
情報の平均重要度	○			○		○		○		○		○
情報の平均有効度	○				○							
情報の平均価値	○						×			○	×	○

[凡例] ◎：特に優れている，○：優れている，×：劣っている（相対評価）

の評価を行った結果を、表5-10～表5-12に示す。また表5-13は、これらの評価結果を整理したものである。ここでは、これらの実行結果及び評価結果について検討を加える。

事象例1では、表5-10に示したように「重要度」「有効度」「価値」においては基本ルールであるルール1の評価値が最も高い。しかしその反面、ルール1では「提供情報板数」が3で、他のルールにくらべて著しく少なく、提供された情報の一つ一つは価値の高いものであるが、広域的な情報提供が行われていないことがわかる。

この点、改良ルールであるルール2～ルール4では、情報板数が5ないし6と、ほぼ全情報板にわたり広く情報提供が行われている。しかし提供情報の内容評価においては、全体的に若干の低下がみられる。これは、図5-20を見てもわかるように、基本ルールでは情報の提供が行われなかった情報板において、ランクの低い情報や、有効度の低い遠方区間の情報が提供されたため、全体としては平均が下がったものである。したがって評価値が低下していても、必ずしも有効な情報提供が行われていないというわけではない。

改良ルールにおけるこの傾向は、5-4-2で述べた改良の基本方針である「改良方針2」の影響によるものである。広域的な情報提供が行われれば、その結果として、提供される情報の内容評価は若干低下することになる。しかしそれは、以上の検討からやむをえないことであり、それ以上に広く情報を提供することに意味があると考えられる。この意味で、改良方針2は妥当性をもつものであったといえる。

事象例2（表5-11参照）において特徴的なのは、ルール2とルール4を用いた場合の重要度が他に比べて特に高い値となっていることである。これは、改良方針1によって次区間の事象にも優先度判断を導入したことによるもので、その影響として提供情報が価値の高いものとなっており、重要な事象を提供しているという点では、改良方針1による改良効果の現れとみることができる。

しかしこの反面、改良による弊害として提供情報数の減少が起きている。具体的には「50キロ規制」というランク3の事象の直後の区間でランク1である「チェーン規制」という重大事象が発生しているため、優先度判断により「50キロ規制」が提供されない結果となっている。

事象例3（表5-12参照）においても同様のことがいえる。この例でもルール2、ルール4では、提供情報の「重要度」「価値」については他のルールと比べて高い値となっているが、やはり提供されない情報があり提供情報数は減少している。

以上のことから、改良方針1については、提供情報の内容という観点からみれば妥当な結果が得られたといえるが、提供もれのない情報提供という面では必ずしも成功していないことがわかる。

また、改良方針3については、改良方針2と同様に広域的に情報提供が行われる結果となった。しかしこの「情報検討範囲」については、本線情報板の「近距離情報の提供」という立場から、一概にその是非を論ずるのは難しい。

一方、これらの現実問題としての交通情報提供への適用性を考えた場合、たとえば事象例1（図5-20）におけるルール4の提供情報について検討すると、茨木ー京都南間で発生している「走行注意」という事象が、尼崎と豊中の情報板でしか表示されず、その結果、豊中、吹田、茨木の3つのインターチェンジから本線に流入したドライバーは、この情報を提供されないまま茨木ー京都南間を走行する結果となる。

このような不都合は、情報板の数に限界がある以上、現実問題として必ず起こることであり、ある程度やむを得ない面もある。しかしより適用性の高いルールを作成するためには、このように、ここで設定している評価値には現れない適用上の不都合に対しても、検討する必要がある。

5-4-4 検討結果のまとめ

本項では、エキスパートシステムの長所のひとつである、ルールの変更の容易な点を利用し、実際の情報提供ルールの改良を試みた。各々の改良に対して、ルールの作成が可能であり、エキスパートシステムの交通情報提供問題への適用性の高さは実証された。

情報提供方式の改良は、いろいろな面で情報提供内容に影響を与え、様々な角度から検討されなければならない。ここでは、いくつかの事象についての検討を行ったが定性的にこれらの評価をとりまとめると表5-13のようになる。以上のようにルールを改良し比較検討を行った結果、今回の改良で行った「次区間最優先の見直し」については今後の課題としてさらに検討を要する。

また、ルールの適用性を考えるうえで、現在の評価値に現れない現実問題の不都合に関する評価についても、今後検討する必要がある。

最後に、今回の改良は本線情報板を対象に行ったものだが、広域情報板についても同様に改良を加えることにより、最終的にはこれらが一体となって相互に密接な関わりを持つ

形で情報提供を行うルールの開発が期待される。

5-5 結 語

現在、人工知能の分野では、多くの技法が開発され、エキスパートシステムも数多く構築されてきている。本研究においても、交通情報提供の問題を解決するためのエキスパートシステムを開発するための基礎的研究を行った。

まず5-2においては、都市間高速道路における情報提供問題を考え、この問題解決にエキスパートシステムを用いることを検討した。また5-3においては、交通情報提供エキスパートシステムの概要と実際の構築を行った。この結果、従来から知られているプロダクションシステムの形式によって、推論が記述されること、構築のための準備が整理された。そして、名神高速道路を対象とした、実際の情報提供に対応した判断システムが構築された。5-4では、エキスパートシステムの特長を生かした適用性の検討という視点から、情報提供の判断のためのルール変更とその評価についての検討を行った。具体的には、初期システムに入力されたルールの他に3種類の変更ルール群を用いることで、判断内容を改良した。そして、さらに情報の評価という視点から、これらルール変更案の妥当性を吟味した。以上のような各章の詳細な検討から、実用性のあるエキスパートシステムが構築されたといえる。最終的にいくつかの重要な検討結果を結論として述べることができる。

- ①エキスパートシステムは「知識」を保存し、これをもとに各種有益な判断を行うシステムである。ここで、取り扱うような情報提供の問題に対しても「知識」は重要であり、その意味でエキスパートシステム利用は有意義である。
- ②本システムは比較的複雑な問題に対しても検討が可能であり、妥当な判断をおこなうものである。したがって、プロダクションシステムとしての構造を持つ情報提供システムが構築され、実際の判断過程を代替的に行いうる可能性が示された。
- ③エキスパートシステムの長所のひとつルールの変更容易性を利用して情報提供ルールの評価・改良が可能である。実際のルール改良において、いくつかの改良方針に基づいて、容易に変更案を提示し、かつ判断を実行することが可能となった。

本研究は、交通工学におけるエキスパートシステムの有効利用を目指した基礎的検討である。今後の研究に対して残された課題を以下に示す。

- ①エキスパートシステムは、基本的には「知識」を取り扱うためのプログラムであるが、そのシステム、特にインタプリタの機能により、推論が決定される。したがって、情報提供問題に十分適応したシステムの完備が望まれる。情報提供ルールの改良に当たっては、適切な判断結果の評価が重要である。今回の評価規準は、ある程度の評価は可能であるが、必ずしも十分ではない。定性要因等も考慮した多面的な評価方法の開発が望まれる。
- ②本研究では、交通工学上で「知識」を用いる問題として交通情報の提供を検討したが、今回作成したエキスパートシステムは、他システムのシェルとして用いることが可能である。したがって、多くの「知識」に基づく判断過程をもつ問題への一層の適用が望まれる。

[第5章参考文献]

- 1) 梶尾拓：道路情報学，（株）ぎょうせい，1986.
- 2) 白井良明・辻井潤一：人工知能，岩波書店，1986.
- 3) 情報処理学会編：知識工学，オーム社，1987.
- 4) 石井一郎・宮田努：道路交通情報，技術書院，1973.
- 5) 石井一郎編著：道路運用学，理工図書，1974.
- 6) 日本道路公団大阪管理局：高速道路の道路情報板運用検討報告書，1985.
- 7) 日本道路公団大阪管理局・（社）交通工学研究会：大阪管理局区内高速道路の交通管制運用に関する研究報告書，1987.
- 8) 秋山孝正・堀田徹哉：交通情報処理エキスパートシステムについて，第32回システムと制御研究発表講演会論文集，pp.201-202，1988.
- 9) 秋山孝正・堀田徹哉：エキスパートシステムの交通情報提供への適用，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，IV-13-1～2，1987.
- 10) 湯浅太一・萩谷昌己：Common Lisp入門，岩波書店，1986.

第6章

高速道路交通安全対策立案への ファジィ理論の応用についての研究

6-1 概 説	195
6-2 都市高速道路の安全対策立案手順	196
6-2-1 都市高速道路における交通事故の基礎的分析	196
6-2-2 安全対策立案手順についての検討	197
6-3 安全対策立案の各種定式化と解法	198
6-3-1 便益費用比を用いる方法	199
6-3-2 増分的費用便益分析による方法	200
6-3-3 ダイナミックプログラミングによる方法	203
6-3-4 整数計画法による方法	204
6-4 都市高速道路における検討	205
6-4-1 対策案の作成	205
6-4-2 計算結果と各手法の比較検討	208
6-5 ファジィ制約を持つ立案計画	213
6-5-1 ファジィ数理計画法	213
6-5-2 ファジィ制約をもつ増分便益費用分析	215
6-5-3 ファジィ制約をもつDPによる分析	217
6-6 結 語	219

第6章 高速道路交通安全対策立案への ファジィ理論の応用についての研究

6-1 概 説

わが国の道路建設は近年整備拡充が行われ、高速道路及び一般国道など充実した整備状況にある。しかしその結果交通量は年々増大の傾向を示し、これが原因となって発生する交通事故は、社会問題となっている。これまでの資料から全国で発生する年間の事故件数をみても昭和45年からは年々減少傾向にあったが、近年わずかではあるが増加の傾向にある。昭和61年中における道路交通事故の発生件数、死傷者および負傷者数は、それぞれ57.9万件、9,317人および71.2万人となっており、依然として道路交通における重大な問題となっているといえる¹⁾。このような状況を招来したのは、無計画なモータリゼーションの進展と自動車の社会的費用の正当な負担がなされていなかったことによる。しかし今やこの問題を正確に認知しどのような方法によってこの解決にあたるかを検討すべきである。

都市高速道路においても多くの事故が発生し、解決ののぞまれる大きな問題となっている。もちろん、交通事故は運転者やその関係者に被害を与えるという点でも重要であるが、交通事故は当事者以外の周囲の環境にも大きな影響を与える。まず直接的には自動車を含む各種交通施設の破壊損失があげられよう。いわゆる物損事故がこれに相当する。また安全走行を考慮した場合には、数々の交通施設も事故時に発生する火災、衝突などの二次的な災害が発生すれば当該車両以外の自動車にも安全性の喪失という点から影響がある。さらに道路交通の円滑で快適な流れを考えると交通事故の発生は道路上に閉塞をもたらし、あきらかに走行を阻害する。

特に都市高速道路などの高速性を得るために周辺街路と隔離してサービスを行っているような道路の場合には、事故による交通閉塞から交通渋滞を生じ、これが道路利用者に対して走行の高速性を阻害することになる。さらに、道路利用者の安全性と輸送力を確保するためこれを管理する関係機関の受ける影響は多大である。偶発的に発生する交通事故を少しでも事前に防止するために、交通警察等では、交通安全の喚起をするための道路標識の整備あるいは、定期的な巡回など、さらには交通安全を高揚させるための広報的活動等

種々の施策がとられている。

このような交通事故防止のための人材の確保また施策実施のための莫大な費用も一つの大きな問題となっている。これらは交通事故の発生があるかぎり必要とされるものであり、本質的に事故発生の件数と関係しているといえよう。本研究においては、こうした都市高速道路における交通安全対策の立案を効率的に行いかつ有効な対策案とする手順について検討することを目的としている。このため、まず6-2において、都市高速道路における交通事故発生の実状を分析するとともに、対策案の立案についての基本的手順についてべる。次に6-3においては、個別の安全対策の組合せとして安全対策の代替案を作成する方法について考察を行う。また6-4においては、都市高速道路における実地的な適用について検討する。さらに6-5において安全対策の立案方法に対して、ファジィ性を考慮した方法論的改良について検討する。

6-2 都市高速道路の安全対策立案手順

6-2-1 都市高速道路における交通事故の基礎的分析

本節では都市高速道路で発生する交通事故・故障車の発生についての現況を把握するためのいくつかの集計結果の基づく簡単な検討を行う。

まず昭和61年度の阪神高速道路大阪地区で発生した交通事故の件数を集計したものが表6-1である。²⁾

この表よりわかるように交通事故は阪神高速道路大阪地区では月平均384件程度の発生がある。人身事故などの大きな交通事故は少ないものの、発生頻度は非常に高く、ほぼ毎日いずれかの地点で起こっていると考えられる。さらに、同表中の交通事故の態様別の内訳を見ると、追突、施設接触が主要なものであることがわかる。これらの態様が多いことは、一般に交通事故が複数の車によって生じることが多く、高速道路の閉塞程度に与える影響が大である可能性が高いことを示すものである。³⁾⁻⁴⁾

表6-1 阪神高速道路の交通事故集計

様態別集計結果		原因別集計結果	
追突	2350(51.1)	前方不注意	1447(31.4)
施設衝突	1009(21.9)	車間距離不適當	1173(25.5)
接触		ブレーキ、ハンドル操作不適當	916(19.9)
車両衝突	958(20.8)	脇見運転	556(12.1)
接触		その他	515(11.2)
横転転覆	58(1.3)		
その他	227(4.9)		
合計	4602 (大阪地区昭和61年度)		

つぎに交通事故の発生原因についても、同表の原因別集計からみることができる。この場合には、前後方不注意、車間距離不適當、ブレーキ・ハンドル操作不適當、などが主要な原因となっている。こうした原因をみると、基本的に運転者の過失による人為的なものが多く、この点運転者の安全意識向上が望まれる。

6-2-2 安全対策立案手順についての検討

一般に交通安全に対する具体的な方策について、いろいろな観点からまとめることができるが、たとえば近年の第3次交通安全基本計画における道路交通安全対策によれば以下のような解決すべき問題点が示されている⁴⁾。

- ①車両の運転者に係る施策の充実
- ②安全で快適な交通環境づくりの推進
- ③車両の安全性を確保
- ④交通安全思想の高揚
- ⑤地域の実情に即したきめ細やかな対策の実施
- ⑥交通事故被害者救済対策の実施

これらの方針は、現在おこなわれている第4次交通安全基本計画にも継続されていることである。ここでは、いくつかの交通安全の視点が示されているが②、③のように物理的な構造物、設備の拡充整備に関係する対策と①、④、⑤のような意識の高揚といった利用者側での注意を喚起し解決を求めようとする対策とがある。これらのすべての対策が十分に実行可能でありかつすべての地域に対して全く同様な検討結果を生むとはいえない。そしてふつう具体的な安全対策案としては図6-1に示すような手順によって物理的な解決を検討することが多い⁵⁾。これはこのような対策がその他の対策案に比べて費用と効果が比較的明確にあらわれ、かつ交通事故の現状を分析することで問題解決の必要な箇所が比較的容易に抽出されることによる。例えばある交通安全のための設備の拡充整備は、現地

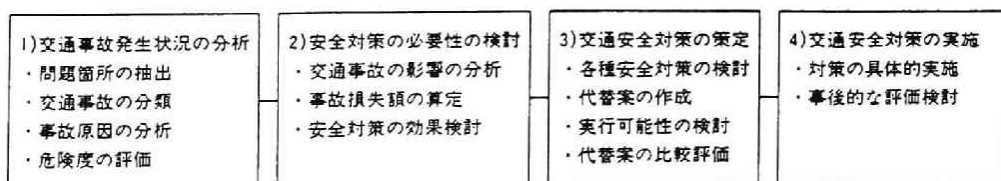


図6-1 安全対策立案手順の例

の問題箇所の抽出と具体的な設備への投資ということで、この手順にしたがって検討することができよう。これまでの研究もこうした手順に基づく交通安全対策案の立案を念頭においたものが中心的となっている。ただ従来の交通事故に関する研究ではこのような手順のうち1)に相当する事故発生に関する研究が多い。特に交通事故の個々の発生メカニズムについての分析⁶⁾あるいは統計的な交通事故発生から危険性を見いだす研究は従来より行われており、それぞれかなりの成果をあげている。また、交通事故の影響の評価、損失の算定などについてはすでにいくつかの研究が行われている^{7)~9)}。これらは主として都市高速道路で発生する事故による渋滞の評価を主とした研究である。事故の損失の評価を行うことは、さきにも述べたようにその影響を具体的に認識する上で重要である。

特にこの場合、交通事故の性質を考えると人命に関わることも十分に有り得ることから、単に事故件数ではなく、個々の事故の差異をなんらかの形で表現し正当に評価していくことが必要であるといえる。また交通事故の評価と安全対策の策定についてもすでに、体系的な研究が行われいくつかの成果をあげている¹⁰⁾。実際の交通安全対策案の検討も重要な一面であり、交通事故は一般の道路利用者のすべてが影響を受けるといえ、事故対策の実施もさまざまな点で実行可能性を検討する必要があるだろう。そして具体的な代替案の作成方法を検討し、どのような手順での立案が有効であるかを確認しておくことは重要である。

こうしたことから本研究においては、事故発生に関する詳細な分析および交通事故の評価は他の研究に譲り、現実に行うことが可能な効果のある交通安全対策の立案のために必要となる手順の検討を行うことを目的とする。したがって本研究においては、図6-1における第3ステップについて検討する。特にここでは、対象を都市高速道路とした場合の問題の性質を考えるとともに対策案策定方法を対策案の組合せとしての代替案作成プロセスと、数案の代替案を評価決定するプロセスの2段階としてとりあつかうものである。

6-3 安全対策立案の各種定式化と解法

ここで述べられているのは、いずれについても交通安全対策代替案の構成要素、すなわち各地点における詳細な個別計画に関して、その計画実施によって生じる費用および効果が貨幣価値によって計上されているとき、これらの組合せとして全体の交通安全対策案を作成する場合を検討している。つまり計画の目標としては、「交通安全対策に要する費用に上限を決定しておき、この範囲内で最も効果的な代替案を求めること」である。これに

については、米国のFHWA（Federal Highway Administration）の報告書に具体的な検討がなされている¹¹⁾。本研究では、ここでの研究方法を参考とし研究を行う。具体的には表6-2に示すような交通安全対策案について検討されている。この表は高速道路の路線ごとに、いくつかの交通事故安全対策を示したものである。

この表において、各行に挙げられているものが個々の地点の安全対策案とこの対策を実施した際に予測される費用と便益である。この費用・便益をあらかじめ求めておくことは難しいが、ここで各路線ごとに交通安全の対策を必要とするため、これらを路線ごとにまとめている。たとえば環状線においては数種類の対策案（あるいは交通安全対策の必要な区間）があるとみなすことができる。ここで

路 線	対策案	費 用	便 益
環 状 線	1	〇〇円	〇〇円
	2	---	---
	3	---	---
⋮	⋮	⋮	⋮
東大阪線	1	〇〇円	〇〇円
	2		

表6-2 交通安全対策代替案の例

の考慮すべき問題は具体的には表中に挙げられているそれぞれの対策案から路線ごとに、ある安全対策予算内で適当な対策案を抽出してこの組合せとして代替案を作成するものである。^{12), 13)}

このような効果の大きい代替案の作成について同じく、F.H.A.の報告書に示唆的な内容が含まれている。これによればこのような代替案設計には以下のような手法が用いられる。

- ① 便益費用比を用いる方法（Simple Benefit-Cost Ratios Analysis）
- ② 増分便益費用分析による方法（Incremental Benefit-Cost Analysis）
- ③ ダイナミックプログラミングによる方法（Dynamic programming）
- ④ 整数計画法による方法（Integer Programming）

本研究においてもこれらの方法論について検討を行う。以下にそれぞれの手法の定式化とその解法の説明を行う。

6-3-1 便益費用比を用いる方法

この方法は従来から用いられている費用便益分析の適用である。したがって、個々の安

全対策についてそれぞれ実施に要する対策費用（ C ）とこれにより得られるであろう便益（ B ）を基準として評価するものである。具体的には、それぞれの対策に対して費用便益比 B/C を計算し、各路線の中でそれぞれこの値が最大のものを抽出する。さらに全予算の制約を満たすように選択を行う。この場合も選択の順序は B/C の値の大きいものの順に行う。

この方法は従来から用いられている便益費用比（Simple Benefit-Cost Ratios）を用いた方法の適用である。したがって個々の安全対策についてそれぞれ実施に要する対策費用（ C ）とこれにより得られるであろう便益（ B ）から求められる B/C を基準として評価するものである。その方法を以下に示す。

〔計算手順〕

- ①それぞれの路線において、提示された各対策に対して便益費用比（ B/C ）を計算しておく。
- ②それぞれの路線で B/C の値の最も大きい対策案を採択する。さらにこれらの対策案を便益－費用比の減少していく方向に並べる。
- ③対策案の累積費用が可能な予算を越えるまで、さきに並べた順に対策案の採択を行う。

6-3-2 増分便益費用分析による方法

この方法（Incremental Benefit-Cost）は、個々の案を比較検討するために費用と便益とによりその指標を求めようとすることは前述の方法と同様である。ここでは費用と便益の限界的な変化を見るためにその増加分によって検討しようとするものである。すなわち、ある案を用いるかわりに別のコストの高い対策案を採用した場合の増分費用（Incremental Cost: ΔC ）とそれによって発生する増分便益（Incremental Benefit: ΔB ）をもとに評価を行うもので $\Delta B / \Delta C$ という値を用いる。

増加費用便益手法は、所与の予算に対するプロジェクトの数理的に最善集合を特定する手順はもたないが、費用のすべての増加分を最善から最悪まで、ランクづけして考えるという長所を持つと考えられている。

このアルゴリズムを以下に概説する。

A_{ij} : 位置 i における代替案 j

C_{ij} : A_i の現行、将来費用の現在価値

MC_{ij} : $C_{ij} - C_{i,j-1}$ A_i の限界あるいは増加費用

B_{ij} : A_{ij} の現行、将来便益の現在価値

MB_{ij} : $B_{ij} - B_{i,j-1}$, A_i の限界あるいは増加便益

R_{ij} : MB_{ij}/MC_{ij} , A_{ij} の限界便益-費用比

ここで、 $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$

①それぞれの路線 i と配列 A_{ij} に対して、実施費用 C_{ij} の増える順に並べる。

②それぞれの A_{ij} に対して R_{ij} を計算する。

$$R_{ij} = MB_{ij}/MC_{ij} = (B_{ij} - B_{i,j-1}) / (C_{ij} - C_{i,j-1}) \quad (6-1)$$

③それぞれの路線 i に対して、 $R_{ij} \leq 1$ となる A_{ij} を行列から削除する。もし A_{ij} が削除されれば、 $B_{i,j-1}$, $C_{i,j-1}$, $B_{i,j+1}$, $C_{i,j+1}$ を用いてすべての A_{ij} を計算しなおす。

こうして路線 i についてすべての A_{ij} が番号を更新されれば、 j の欠番はなくなる。

④路線 i について、 R_{i1} と R_{i2} を比較する。もし R_{i2} が R_{i1} より大きいならば、限界便益-費用比

$$R_{i2}^* = (MB_{i1} + MB_{i2}) / (MC_{i1} + MC_{i2}) = MB_{i2}^* / MC_{i2}^* \quad (6-2)$$

とし、予算制約から A_{i2} が選択集合から排除されるが、 A_{i1} は適する場合には、 A_{i1} を配列に残しておく。

R_{i2}^* と R_{i3} を比較する。もし R_{i3} が R_{i2}^* より大きい場合には、増加分を

$$\begin{aligned} R_{i3}^* &= (MB_{i1} + MB_{i2} + MB_{i3}) / (MC_{i1} + MC_{i2} + MC_{i3}) \\ &= MB_{i3}^* / MC_{i3}^* \end{aligned} \quad (6-3)$$

前述と同じ要領で A_{i2} を配列に残しておく。もしいずれかの R_{il} が $R_{i,l-1}$ (あるいは $R_{i,l-1}^*$) より小さく、 R_{il} が $R_{i,l+1}^* = (MB_{il} + MB_{i,l+1}) / (MC_{il} + MC_{i,l+1}) = MB_{i,l+1}^* / MC_{i,l+1}^*$ で与えられるように $R_{i,l+1}$ と結合されなければならない場合には、 $R_{i,l-1}$ と $R_{i,l-1}$ (あるいは $R_{i,l-1}^*$) を比較する。もし $R_{i,l+1}^*$ が $R_{i,l-1}$ (あるいは $R_{i,l-1}^*$) より大きければ、増加分を結合して、

$$R_{i,l+1}^{**} = (MB_{i,l-1}^* + MB_{i,l+1}^*) / (MC_{i,l-1}^* + MC_{i,l+1}^*) = MB_{i,l+1}^{**} / MC_{i,l+1}^{**} \quad (6-4)$$

とする。この R_{il} (あるいは R_{il}^* など) が直前の増分比 ($R_{i,l-1}$, $R_{i,l-1}^*$ など) より大きい限り、この結合手順を続ける。

この手順は“平均”便益－費用比を与え、 R_{ij} の値が増加する場合には必要である。というのは、与えられた費用の増加から得られる便益は、その前の増分が用いられなければ、実現することができないからである。

もし R_{il} (あるいは R_{il}^* など) が適当な前回の増加分よりも小さければ、もはや結合の必要はない。

⑤すべての代替案をそれぞれの適切な限界費用 (MC_{ij} , MC_{ij}^* など) を用いて、適切な増分費用便益比 (R_{ij} , R_{ij}^* など) の減少する順に並べる。

⑥最高の増分便益－費用比から最低のものへ向かって、対応する限界費用を加算しながら予算内に入る代替案を選択する。もしある A_{ij} が予算限界を越えて採用されない場合には、その A_{ij} を検討から除外し、他の代替案が採用されるまで続ける。

もはや、予算制約をこえずに加えられる代替案がなくなれば、選択は終了する。

この方法は、ステップ6で計算される累積費用に対して最適な対策案集合が得られることを保証するものである。

この計画で開発された増加費用便益分析に対する改良アルゴリズムは2つの視点の前述の便益費用分析の定式化に対して優っている¹¹⁾。

まず、この方法は多くの数のプロジェクトに対する相互に非独立な代替案に対する費用の増分を順序づけする効果的な方法を示すものとなっている。

第2に、さらにこのアルゴリズムでユニークな点は、たとえある地点におけるいかなる増加費用が、つぎの最小 (あるいはいくつかのケースで増分の組合せ) の費用増分よりも高い便益－費用比率を与えても、特定の地点の費用の平均超過分に対して、明示的な方法が与えられる。

この方法の増加便益－費用に関する計算メカニズムについては、図6-2に示すようである。この場合2つの対策案があるが、費用の増加とそのときの便益から本図に示すような関係を描くことができる。ここで定義により、 R_1 は直線 OP の傾きであり R_2 は直線 PQ の傾きである。本図の場合には $R_2 > R_1$ であるから、アルゴリズムにしたがえば、 R_2 の代わりに R_2^* (すなわち図中の直線 OQ の傾き) を用いるわけである。この計算過程は

「費用の増加に伴ってより便益を増加させることが可能な対策案を抽出する」という作業を行うものと解釈することができる¹³⁾。したがって最終的にはアルゴリズムで得られる各々の R が各対策案の評価値となっている。

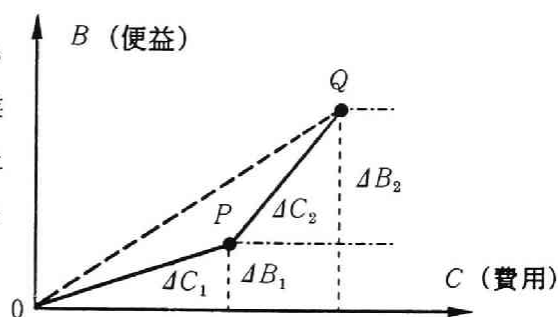


図 6-2 増分便益費用分析の計算

6-3-3 ダイナミックプログラミングによる方法

この方法 (Dynamic Programming) は「一定の予算内で実現される便益を最大にする。」という点から数理計画法として定式化したものである。特に各路線から適当な対策を順次抽出していくという段階的な発想を持つ決定問題には有効である。

ここで注意すべき点は、①各ステップで路線ごとに「対策を実施しない」費用、便益とも 0 の対策案を加えておくこと、②各ステップの費用は適当な単位費用を考えて段階的に検討していくことである。実際の定式化は以下のようになされる。(第 n ステップにおける定式化)

$$f_n(S_n) = \max \{ r_n(S_n, d_n) + f_n(S_{n-1}) \} \quad (6-5)$$

$$S_{n-1} = S_n - C(d_n) \quad (6-6)$$

ここに

S_n : n ステップにおける総費用

d_n : n ステップでの選択対策案

$f_n(S_n)$: n ステップにおける最大全便益

$r_n(S_n, d_n)$: 総費用 S_n で d_n 案を採用した際の便益

$C(d_n)$: d_n 案実施に要する費用

[計算手順]

①各ステップにおいては、費用 S_n で実行可能な対策案 d_n を採択し、この $r_n(S_n, d_n)$ と残り費用の S_{n-1} から求めた $f_n(S_{n-1})$ [式 (6-6)] との和が最大となるものを $f_n(S_n)$ とする [式 (6-5)]。

② $f_n(S_n)$ のなかで最大のものを最大便益とする。

③順次第1ステップ(第1路線)から第 n ステップ(第 n 路線)まで計算する。

このアルゴリズムからもわかるように、問題の構造からいえばステップはここで考える都市高速道路の路線数に一致し、またそれぞれのステップにおいては増加費用に対する演算を実行していることになる。

6-3-4 整数計画法による方法

この方法(Integer Programming)も数理計画的な方法である。この場合にはそれぞれの案を実施するかしないかを決定することを定式化の考え方としている。すなわちそれぞれの案の実施の有無を変数とし、この値の0か1を決定することで対策を抽出しようとするものである。これは以下のように定式化される。

$$\max \sum_i \sum_j b_{ij} x_{ij} \quad j \in J : \text{各路線での案の集合} \quad (6-7)$$

$$i \in N : \text{検討路線数} \quad (6-8)$$

s.t.

$$\sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \leq B$$

$$\sum_k x^k = 1 \quad k \in G : \text{各路線での実行可能案の数} \quad (6-9)$$

$$x = 0, 1 \quad (6-10)$$

x : 各対策案の選択変数、 b : 便益係数、 c : 費用係数、 B : 予算制約である。

これは0-1整数計画問題といわれるものである。目的関数(6-7)式は各対策を実施した際の総便益の最大化である。また制約条件としては、変数の0-1条件に加えて、(6-8)の総予算の制約と(6-9)式の「ひとつの路線で最大1つの案を選択する」ことを示すものがある。その解法には「バラスの間接列挙法」を用いることができる。一般にバラスの列挙法で解かれる問題は最小化問題であり、正係数をもつ目的関数の解法を行うものである。本研究で取り扱う問題は、正の係数の目的関数最大化問題(便益の最大化)である。したがって最小化問題として解く場合には目的関数の変数の係数はすべて負になる。そこで変数を $y_{ij}=1-x_{ij}$ とおくことによって変数の係数を正にした後にこの方法を適用することができる。具体的なバラスの列挙法の計算手順を以下に示す。

[計算手順]

- ① Z に f の取り得る最大値をいれておき、部分解集合 S を空ベクトル \emptyset とする。
- ② S にある自由変数を 0 にして、満足されない制約条件式の集合 V を求める。
- ③ $V = \emptyset$ であれば⑨へ、そうでなければつぎへ
- ④ 部分解 S に対応する f を求めて、 $Z = Z - f$ とする。
- ⑤ つぎの 2 つの条件を満たす自由変数の集合 T を求める。
 - a. $Z - f$ より小さい係数を持つもの
 - b. V 中のいずれかの制約において、正の係数を持つもの
- ⑥ $T = \emptyset$ であれば⑪へ、そうでなければつぎへ
- ⑦ T 中のある変数のみを S に追加して V 中の各制約が満足されなければ⑪へ、そうでなければつぎへ
- ⑧ T のなかの最大の係数をもつ自由変数を S に加えて②へ
- ⑨ S に対応した部分解 X が現在の最良解となり、目的関数 $f = Z$ とする。
- ⑩ S のなかで最も左側にある正の要素をその補元で置き換えて、それより右側の全要素を削除して②へ
- ⑪ S 中の全要素が負であれば終了し、そうでなければ⑩へ

この方法は「一定の予算内において実現される便益を最大にする。」という観点からこれを数計画法として定式化したものである。ここで示したものは 0-1 計画法の解法であるが、当然のことながら一般の整数計画の解法を用いることも可能である。

6-4 都市高速道路における検討

6-4-1 対策案の作成

都市高速道路ではいろいろな原因の交通事故が発生する。また、本来交通事故は偶発的事象であるのでいかなる場所においても交通事故が起こる可能性があると考えられる。しかし、道路の構造上の問題や過大な交通量が事故の発生する原因となっている場合も多く、このような場合には、事故が多発する場所はある程度まで限られる。そして、ふつう事故多発地点は、統計的な分析から得られる場合が多い。

これまでの分析から、一般的に曲線部、合流部、分岐部での交通事故が多いことがわかる。

したがって、個別の地点ごとに交通安全対策が考えられるが、この場合にも、道路構造に原因が求められることが多く、いくつかの安全施設の整備を行う場合が多い。

表 6-3 交通安全施設とその費用

各部	対 策	記号	費 用
曲 線 部	赤色点滅燈の設置	C_1	1 0 0
	警戒標識の設置	C_2	7 8
	注意標識の設置	C_3	7 0
	路面標示	C_4	3
	垂直面表示	C_5	1 5 0
分岐 部	路面標示	D_1	3
	クッションドラム	D_2	1 3
合流 部	路面標示	G_1	3
	レーンデバイダ	G_2	2 0

そこで、これらの場所に設置する安全施設とその1箇所の設置に要する費用を示したのが表6-3である。本表からもわかるように、曲線部においては比較的多くの対策がある。また分岐部、合流部では特別施設の設置が行われる。これらの施設について以下に簡単に説明する。

①赤色点滅燈 (flashing light)

(単位：万円)

曲線部などの走行上危険と考えられる箇所に設置し、運転者の注意を喚起するために、赤色燈火の点滅によってこれを知らせるもの。

②警戒標識 (warning sign plate)

運転者に対し道路上、沿道の危険または注意すべき状態を予告し、必要な減速や注意深い運転を要求するもの。道路構造の補完的役割を果たし、道路の屈折、幅員、車線減少箇所、急勾配・横風、道路工事、合流地点などを示す。

③注意標識 (auxiliary sign plate)

いわゆる補助標識に属するものであり、中央分離帯などに設置され、利用者の走行に対する注意を喚起するために設置されるものである。

④路面標示 (road marking)

交通を整理、誘導、規制するために舗装路面上に設置される白色または黄色の標示で、車道中央線、車線境界線、導流標示などがある。高速道路では分岐・合流を示すものが多い。

⑤垂直面標示 (object marking)

道路内にあり車両の進路変更の必要のある構造物、また道路外で走行車両の側方余裕を少なくしている構造物、車両が路外に逸脱した場合、衝突の危険のある構造物等の前面に標示する。高速道路等では、フェンス面に45°方向に黄色と黒色の交互の縞で標示される

ものが多い。

⑥クッションドラム (cushion drums)

道路の付属施設であり、衝突時の衝撃を和らげるためのものである。円筒状をしたものが多く、ふつう複数個同時に設置される。

⑦レーンデバイダ (lane divider)

同方向の交通流を分離するための分離帯。側道との間にある外側分離帯と異なり、その両側における交通の性格は本質的に同じものである。

本研究においては、阪神高速道路において報告されている事故多発地点を参考に交通安全対策の個別案を作成した。(阪神高速道路の主要路線としては、環状線、守口線、空港線、神戸西宮線、松原線、堺線、東大阪線の7路線を対象路線とし、上下線の区別は行っていない)。

これを示したものが表6-4であり、本表には作成された各対策案の組み合わせをしめ

表6-4 個別対策代替案の内容

	路線	番号	対策案の内容
①	I	1	$C_1 \times 10, C_3 \times 10, D_1 \times 20, G_1 \times 20$
②		2	$C_1 \times 10, C_2 \times 10, C_3 \times 10, D_2 \times 20, G_1 \times 200$
③		3	$C_2 \times 10, C_3 \times 10, C_5 \times 6, D_1 \times 20$
④	II	1	$C_3 \times 10, D_1 \times 20, D_2 \times 20, G_2 \times 20$
⑤		2	$C_2 \times 4, D_1 \times 20, D_2 \times 10$
⑥	III	1	$C_1 \times 8, C_4 \times 10, D_1 \times 10, G_1 \times 10, G_2 \times 10$
⑦		2	$C_1 \times 2, C_5 \times 2, G_1 \times 10, G_2 \times 20$
⑧		3	$C_2 \times 10, C_3 \times 10, G_1 \times 20, G_2 \times 40$
⑨	IV	1	$D_1 \times 40, D_2 \times 20$
⑩		2	$C_1 \times 10, D_1 \times 20, D_2 \times 10, G_2 \times 10$
⑪		3	$C_1 \times 10, C_3 \times 10, C_4 \times 10, D_1 \times 40, D_2 \times 10, G_1 \times 10, G_2 \times 20$
⑫	V	1	$C_1 \times 10, D_1 \times 40, G_1 \times 20$
⑬		2	$C_2 \times 10, C_3 \times 10, C_5 \times 6, D_2 \times 10, G_1 \times 10$
⑭		3	$C_2 \times 10, C_4 \times 10, G_1 \times 10$
⑮	VI	1	$C_1 \times 10, C_2 \times 10, C_5 \times 10, D_1 \times 20, D_2 \times 20, G_2 \times 20$
⑯		2	$C_1 \times 10, C_5 \times 6, D_1 \times 40, D_2 \times 40, G_2 \times 10$
⑰		3	$C_3 \times 10, C_4 \times 10, D_2 \times 20, G_1 \times 10, G_2 \times 10$
⑱	VII	1	$C_3 \times 10, D_1 \times 10, G_1 \times 10$
⑲		2	$C_5 \times 2, D_2 \times 20, G_1 \times 20, G_2 \times 20$

ている。具体的には、それぞれの対策案でさきに示した個々の安全施設を何箇所を設置するかが基準となっている。

たとえば環状線の第1案（表中のⅠ-1）は、具体的には、曲線部で赤色点滅灯と注意標識示をそれぞれ10箇所（ $C_1 \times 10$ 、 $C_3 \times 10$ ）、分岐部で路面標示を20箇所（ $D_1 \times 20$ ）、合流部で路面標示を20箇所（ $G_1 \times 20$ ）にそれぞれ設置するものである。したがってこの費用は、これらの個別施設の経費の総額で、1820万円となっている。また同様に、便益欄はこの対策案の実施効果を予測計上したものである。実際にはこれまでのいくつかの研究にみられるように交通事故に対する直接間接の経済的評価が可能でなければならない⁵⁾⁻⁸⁾。本研究においてはこの点についての検討は割愛し計算上不都合のない値とした。

またこれら対策案の設定にあたっては、たとえば「空港線では合流部の事故が多く、他路線よりも合流部への安全対策に重点をおく必要がある」などの実状からみた考慮がされている。

この表6-4に基づきかつ、前述の事故多発地点を参考に阪神高速道路における交通安全対策案を作成した。その内容を表示したものが表6-5である。各々の対策の費用欄は安全施設にかかる費用の総和を表している。

この費用は、これらの個別施設の経費の総額で表されている。また同様に、便益欄はこの対策案の実施効果を予測計上したものである。この算出にはこれまでのいくつかの研究にみられるように交通事故に対する直接・間接の経済的評価が可能方法を用いなければならない⁵⁾⁻⁸⁾。本研究においてはこの点の検討は割愛し計算上不都合のない値を設定値として示している。

表6-5 安全対策代替案の費用と便益

路線名	路線番号	対策案の番号	費用(万円)	便益(万円)
環状線	Ⅰ	1	1 8 2 0	1 9 2 0 0
		2	3 3 4 0	2 1 7 0 0
		3	2 4 4 0	2 5 6 0 0
守口線	Ⅱ	1	1 4 2 0	1 3 3 0 0
		2	5 0 2	6 4 0 0
空港線	Ⅲ	1	1 0 9 0	1 0 5 2 0
		2	9 3 0	6 7 5 0
		3	2 3 4 0	2 2 5 2 0
神戸西宮線	Ⅳ	1	3 8 0	3 0 0 0
		2	1 3 9 0	1 2 3 0 0
		3	2 4 1 0	2 4 7 1 0
松原線	Ⅴ	1	1 1 8 0	7 2 0 0
		2	2 5 4 0	2 4 8 9 0
		3	8 4 0	5 9 8 0
堺線	Ⅵ	1	4 0 0 0	4 0 4 0 0
		2	2 7 4 0	2 4 1 0 0
		3	1 2 2 0	1 1 5 9 0
東大阪線	Ⅶ	1	7 6 0	7 3 0 0
		2	1 0 2 0	9 4 2 0

6-4-2 計算結果と各手法の比較検討

前項では、各路線ごとに対策案が複数個提示された。ここでは、これをさきに示した4

種類の各計算手法を用いて妥当な組合せとしての代替案作成を行う。本例においては、計画上の予算の制約として、昭和61年度の阪神高速道路の維持修繕費182億9800万円の約0.4%の7900万円を設定し、これを以下の計算に用いている。

表6-6 各方法による計算結果

計算方法	選択された対策案	総費用	総便益
便益費用比	I-1, II-2, IV-3	4732 (万円)	50310 (万円)
増分便益費用分析	I-3, II-2, IV-3, V-2	7892	81600
D P	I-3, II-2, VI-1, VII-1	7702	79700
I P	I-3, II-2, IV-3, V-2	7892	81600

さきに示した各手法で計算を実行し、対策案の選定を行い全交通安全対策の方法をそれらの組合せで示したものが表6-6である。この表に示される意味は、例えばD Pによる方法では環状線、守口線、堺線、東大阪線のそれぞれ3、2、1、1番目の対策案が採択され、代替案は4路線を対象としたものとなる。

同一の制約のもとで計算方法ごとに異なった計算結果を導出しているため、これらの結果からそれぞれの方法についての比較検討を行うことができる。便益の大きいものほど良い結果をもたらしているとすればこの例では、 $IP = IBC$ (増分便益費用) $> DP > BC$ (便益費用比) の順に解が得られている。

以下では、個々の方法について検討を行う。

(1) 便益費用比による分析

この方法は単純であり、解を得ることもきわめて簡単であるが組合せとしての最適性を考えていないため、当然のことながら不十分な解となっており、総便益も極端に小さいものとなっている。

つまり単純な費用便益分析に対してその他の方法はいずれも有効な結果が得られるということがわかる。これは、費用便益分析の場合には、個々の路線での便益最大の選択は行いが、全体として最適な代替案を求める基準が含まれていないためと考えられる。

(2) 増加便益費用による方法

この方法はすでに述べたように、対策案同士の関係を一方の対策案を選択するために必要な増加費用に対して、どの程度の便益増加が見込まれるかという点から開発されたアルゴリズムである。

したがってこの方法の最終的な利点は、演算結果から表6-7に示すようなワークシートが得られる。この表ではすでに増分費用便益比によって作成されていることから、対策案

の選択構造が容易にわかるようになっている。

とくに予算が増加したような場合には有効であると考えられる。

(3) DPによる方法

この方法の場合には、定式化の部分でも述べたように、計画における単位費用増加分(increment of cost)を考えることができる。上記の場合には、100(万円)となっている。

したがって、実際の計画実施に際する最小単位を100万円とし、またこの予算の増額を100万円単位とするということである。これは各安全対策案が実施された場合においても同様に考えることができる。すなわち個別安全対策にしても複数で同時に実施されて初めて効果を与える場合や、また投資される予算が一定の単位で計算されている場合に対応する。

この単位費用の大きさによって異なる最終選択結果が得れるが、これを図示したものが、図6-3である。本問題の場合には、個々の対策案が最小10万円の単位で表示されているため、10万円とした場合には、厳密に解を求めた場合に相当している。最大の便益を与える解(81600万円)と一致する。ここで単位費用増加を大きくすれば、当然詳細な組合せの差異は無視されることになるので、計算結果として得られる便益を比較すれば小さな値となることがわかる。

しかし、部分的には10万円程度の増加の場合には逆に、得られる解での便益が大きくなる場合もある。これは、①最適な組合せの解と近い便益額を与える解が比較的多く存在すること、②単位費用は検討の詳細さを決定づけるが予算を考えるステップの幅が妥当でない場合もあるといったことに起因すると考えられる。

このステップ幅の決定は計算の効率性とも関係がある。したがっていかなるステップ幅(単位費用)を用いるかによって、計算の容易性と得られる解の詳細性とがトレードオフの関係にある。この方法では、先に述べた単位100万円の場合の計算結果では、最良解から2.3%の便益減少がみられる。この程度の減少が解の良否に関係するか否かは検討の余地がある。小さな幅で計算を行うことは当然その各ステップの演算回数を増加させること

表6-7 増分便益費用分析のワークシート

対策番号	増分費用	増分便益	R_{ij}	総費用	総便益	採否
II-2	502	6400	12.75	502	6400	*
I-1	1820	19200	10.55	2322	25600	*
I-3	620	6400	10.32	2942	32000	*
IV-3	2410	24710	10.25	5352	56710	*
VI-1	4000	24890	10.10	9352	97110	*
V-2	2540	10520	9.80	7892	81600	*
III-1	1090	7300	9.65	8982	92120	
VII-1	760	12000	9.60	8652	88900	

(単位: 万円)

になり、演算に要する時間は増大することは明かである。

したがってこの方法を用いる場合には、いかなる単位費用を用いるかを計画段階で考慮する必要がある。

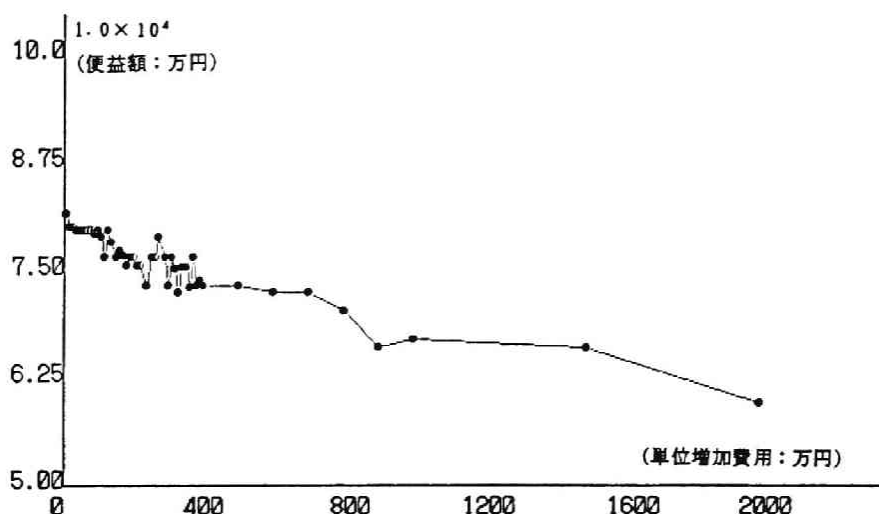


図 6-3 単位増加費用と DP の解

(4) 整数計画法による方法

この方法は、本来の交通安全対策立案過程を「路線ごとに対策を考えながら一定予算内で最大の便益を生ずる組合せを探す」という本来の計画内容を忠実に定式化しているといえる。この例の場合には、具体的には以下のような問題を解いていることになる。

$$\begin{aligned}
 \max \quad z = & 19200x_1 + 21700x_2 + 25600x_3 + 13300x_4 + 6400x_5 + 10520x_6 \\
 & + 6750x_7 + 22520x_8 + 3000x_9 + 12300x_{10} + 24710x_{11} + 7200x_{12} \\
 & + 24890x_{13} + 5980x_{14} + 40400x_{15} + 24100x_{16} + 11590x_{17} + 7300x_{18} + 9420x_{19}
 \end{aligned} \tag{6-11}$$

$$\begin{aligned}
 \text{s. t.} \quad & 1820x_1 + 3340x_2 + 2440x_3 + 1420x_4 + 502x_5 + 1090x_6 \\
 & + 930x_7 + 2340x_8 + 380x_9 + 1390x_{10} + 2410x_{11} + 1180x_{12} \\
 & + 2540x_{13} + 840x_{14} + 4000x_{15} + 2740x_{16} + 1220x_{17} + 760x_{18} + 1020x_{19} \leq 7900
 \end{aligned} \tag{6-12}$$

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 1 \tag{6-13}$$

$$x_4 + x_5 \leq 1 \tag{6-14}$$

$$x_6 + x_7 + x_8 \leq 1 \quad (6-15)$$

$$x_9 + x_{10} + x_{11} \leq 1 \quad (6-16)$$

$$x_{12} + x_{13} + x_{14} \leq 1 \quad (6-17)$$

$$x_{15} + x_{16} + x_{17} \leq 1 \quad (6-18)$$

$$x_{18} + x_{19} \leq 1 \quad (6-19)$$

ここで特に各路線については、いずれの対策案を実施しないかあるいは1つの代替案を選択することになるので、このような制約条件をもっている。ここで、特定の路線の安全対策を優先して考えることを試みる。これは、上記のような定式化が一旦なされている場合には比較的用意であり、「特定路線についての制約条件を変更する」ことで解決できる。たとえば、空港線でかならず対策を実施するといった場合には、第4番目の制約条件〔(6-15)式〕を以下のような等号制約に置き換えることに対応している。

$$x_6 + x_7 + x_8 = 1 \quad (6-20)$$

このようにして、他の問題の構造は同様として0-1計画問題を解けばよい。各路線をそれぞれ優先した場合の最適解を表6-8に取りまとめる。さきに求めたもとの制約条件

表6-8 整数計画法の定式化による各解の相違

優先路線	制約条件	対策案集合	総便益
無(原問題)	$x_i + x_j + x_k \leq 1$	I-3, II-2, IV-3, V-2	81600
空港線	$x_6 + x_7 + x_8 = 1$	I-1, II-2, III-3, IV-3, VII-1	80130
堺線	$x_{15} + x_{16} + x_{17} = 1$	I-1, II-2, III-1, IV-3, VI-3, VII-1	79720
その他路線	$x_i + x_j + x_k = 1$	I-3, II-2, IV-3, V-2	81600

での解にすでに含まれている路線については当然同一の解が得られている。空港線、堺線、東大阪線を優先して考えた場合には若干ではあるが総便益としては小さい解が得られている。しかし、空港線、東大阪線を優先する場合には5路線、堺線の場合には6路線に対して対策を実施する組合せが得られており、いずれもなるべく多くの路線を検討対象とすべ

き結果を見いだしている点は興味深い。

このように整数計画法による定式化は条件式を変化させることが容易であり各種の検討に有効である。

6-5 ファジィ制約を持つ立案計画

6-5-1 ファジィ数理計画法

まず一般的なファジィ数理計画についてのべる。ファジィな制約をもたせることは、結局、計画段階における予算面での余裕を持つ計画を行うことである。もし予算の面での硬い制約のもとでの計画が実行される場合には、これを若干でも超過する代替案は選択される可能性は少ない。

ファジィ OR の概念は、1970年に R.E. Bellman (動的計画法で著名) と L.A. Zadeh が、ファジィ環境における意志決定として、代替案の集合 X 上にファジィ目標 (fuzzy goal) とファジィ制約 (fuzzy constraints) が与えられた際の意志決定に関して検討を行ったものが端緒である。ここでファジィ目標 G とファジィ制約 C は、それぞれメンバシップ関数 μ_G 、 μ_C によって定義される代替案の集合 X 上のファジィ集合である。

このとき、ファジィ目標とファジィ制約を統合した決定集合を定義する必要がある。Bellman と Zadeh は、ファジィ目標 G とファジィ制約 C を同時に満たすことを考慮して、ファジィ決定 (fuzzy decision) D を、ファジィ目標 G とファジィ制約 C との共通集合と定義した。¹⁸⁾

すなわちファジィ決定 D は、

$$D = G \cap C \quad (6-21)$$

であると定義され、そのメンバシップ関数は、

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x) \quad (6-22)$$

である。一般に複数のファジィ制約が存在する場合への拡張は容易に行うことができる。 G_1, G_2, \dots, G_n をファジィ目標とし、 C_1, C_2, \dots, C_m をファジィ制約とすれば、ファジィ決定 D は、

$$D = G_1 \cap G_2 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_m \quad (6-23)$$

と定義され、このメンバシップ関数は以下のものである。すなわち目標と制約の共通の満

足程度をメンバシップ関数として表現したものである。

$$\begin{aligned}\mu_D(x^*) &= \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq m}} (\mu_{G_i}(x), \mu_{C_j}(x)) \\ &= \min(\mu_{G_1}(x), \dots, \mu_{G_n}(x), \mu_{C_1}(x), \mu_{C_m}(x))\end{aligned}\quad (6-24)$$

ファジィ決定 D における意志決定としては、 D に帰属する度を最大にするような x を選ぶという最大化決定が提案されている。^{1), 4)} すなわち、図 6-4 にしめすような意志決定を行っていることになる。

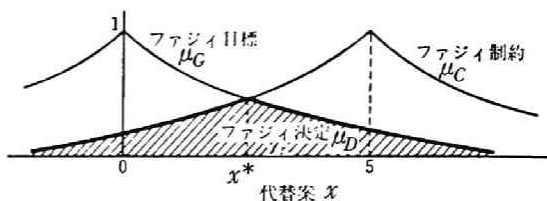


図 6-4 ファジィ意志決定の概念図

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) \quad (6-25)$$

となるような x^* を求めるものである。ここで、このような x^* は存在しない場合もあれば、無数に存在する場合もある。またこの最大化決定の他に「凸ファジィ決定」や「積ファジィ決定」などが提案されている。

[ファジィ数理計画法の解法]

さきに述べた (6-25) の最大化問題は、 α レベル集合を用いてつぎの最大化問題に転化できる。

$$\sup_x \mu_D(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \wedge \sup_{x \in C_\alpha} \mu_G(x)] \quad (6-26)$$

このことから一般にファジィ数理計画法の解法は、図 6-5 に示すようである。すなわち、 α カットによって反復計算を行うものである。本図よりわかるように、このアルゴリズムには「通常の数理計画問題」の解法をプログラム中に含んでいる。¹⁹⁾ したがって、こ

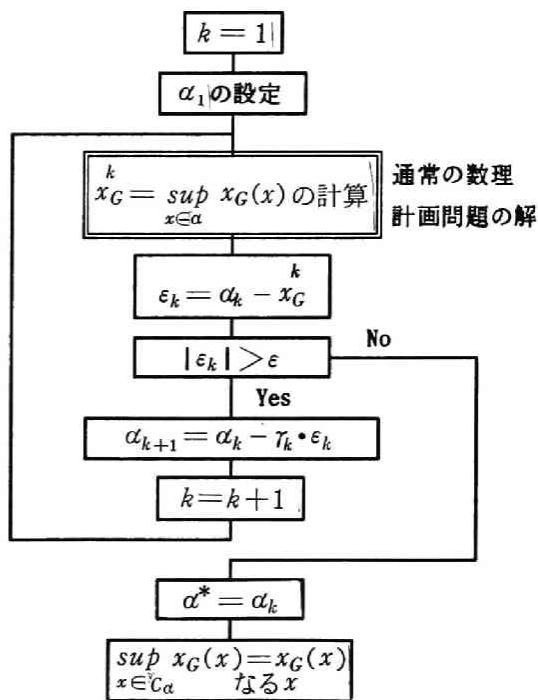


図 6-5 ファジィ数理計画問題の解法手順

のアルゴリズムを用いることで、数理計画問題はすべてファジィな意志決定問題に拡張できることがわかる。

一般に目的関数のメンバシップ関数値と制約条件のメンバシップ関数の値の一致する部分を求めることで解を求めることができる。つまり最終的に制約と目的の満足程度の均衡状態を得ていることに相当する。

6-5-2 ファジィ制約をもつ増分便益費用分析

結局、本研究における代替案作成問題は、組合せ最適化問題 (Combinational Optimization Problem) であるから、この問題から得られる解は連続的には変化せず、段階的な変化をする。したがって目的関数と制約条件のメンバシップ関数はそれぞれ階段関数と連続関数となり、「ファジィな最適化」は必ずしも交点を持つとは限らないのである。このことは、図6-6および図6-7に示されるようである。両関数に交点が存在する図6-6におい

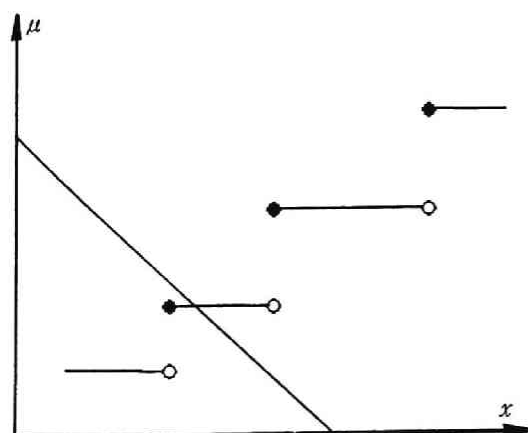


図6-6 ファジィ制約 (ケース1)

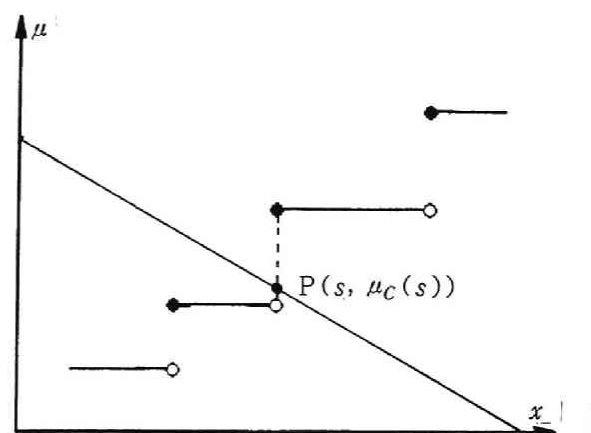


図6-7 ファジィ制約 (ケース2)

ては問題がないが、各関数が交点を持たない図6-7の場合には、図中の $P(s, \mu_C(s))$ が最適点を示すが、本図からもわかるように、このときの目的関数のメンバシップ関数値、 $\mu_D(s)$ との関係はかならず、

$$\mu_D(s) \geq \mu_C(s)$$

であることが見いだされる。ここでの演算のあるために必要なアルゴリズムを若干改良

する必要がある。このアルゴリズムは図6-8に示すとおりである。これはこの形の問題を解くために秋山・内田によって開発されたものである。簡単にそのメカニズムを考えると、制約条件のメンバーシップ関数を考え α カット、 $\alpha = 1$ から計算をはじめ、 α を順次減少させある値をこえたとき、初めて $\mu_D(s) \geq \mu_C(s)$ の条件が満たされなくなったら、その直前の値を求めるというものである。

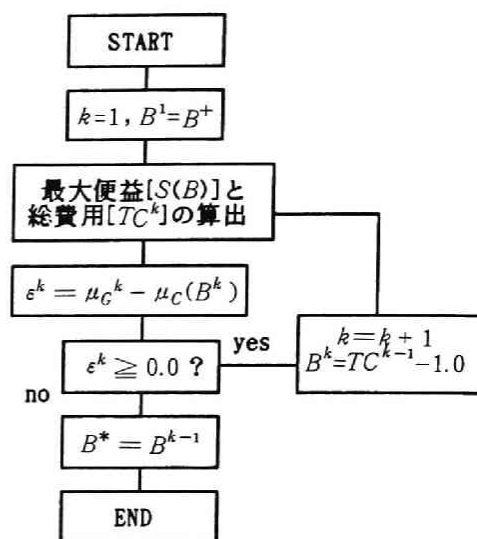


図6-8 ファジィ増分便益費用分析の解法手順

(2) 計算結果とその検討

ここでは、予算のファジィ性を考えるために、制約条件に対して2種類のメンバーシップ関数のタイプを考えた。これを図6-9および図6-10に示す。前者は線形に変化するメ

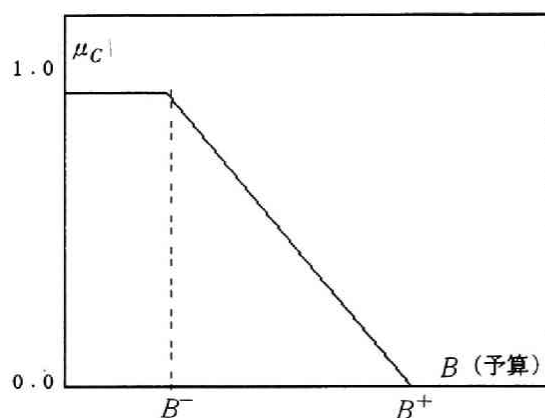


図6-9 線形の費用制約条件

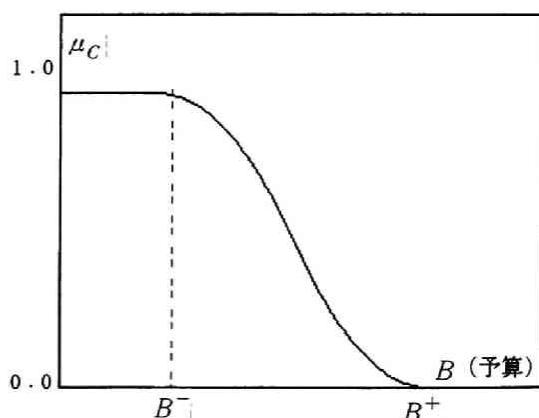


図6-10 Z関数による費用制約条件

ンバシップ関数であり、後者はZ-関数とよばれるものである。このとき、それぞれの制約条件の最大値 B^+ を変化させて、最適解を求めた場合の費用および便益を表6-9に示す。制約条件の上限を大きくすると当然のことながら得られる解も大きくなっている。また関数形による差異を比較すると、 $\mu_C > 0.5$ の部分ではZ-関数の偏曲の程度にしたがって制約も変化するので、つねに線形の場合に比べて、費用・便益ともに大きな値をとる解

表 6-9 ファジィ増分便益費用分析の計算結果

予算制約	8000	9000	10000	11000	12000	13000
線形制約	81600 (7892)				91020 (8912)	97110 (9352)
Z関数 制約	81600 (7892)	88900 (8652)		91020 (8912)	97110 (9352)	104410 (10112)

総便益（総費用）

が得られている。

このような定式化を行った場合には、以下のような点が解の決定に関与することになる。

- ①この問題の定式化において、制約条件の最大値は結局、各変数の許容される変化分を考慮した場合の値を求めることになる。したがって、この場合には目的関数のメンバシップ値の分母を決定していることになる。すなわち、目的関数の取りうる値の上限が決定されることになり、この値が B^+ の値の増加に伴って増加すれば、最終的にメンバシップ関数の値は小さくなる。
- ②制約条件の上限 B^+ を変化させることは、結局メンバシップ関数の傾斜を変化させていることにはかならない。したがって、この値を増加させると傾きは緩やかになる。したがって、変数の値の増加に対しては、その変化が緩慢になる。

この問題では、目的関数と制約条件の両者のメンバシップ関数の値から最終的な満足の程度を決定することができるのでこの点では有効である。

6-5-3 ファジィ制約をもつDPによる分析

（1）ファジィ制約を持つDPの解法

ファジィ数理計画法による方法は、一般の数理計画問題に適用することができる。したがってさきに増分便益費用分析でもちいたアルゴリズムをそのまま用いることができる。しかし、この場合にはさきにも述べたように動的計画を行うときの単位費用増加分が重要である。したがって、ここでは得られる解の特徴をみるために、予算の制約に対するメンバシップ関数は線形に変化するものとした。

（2）計算結果とその検討

ここでは解の変化傾向を見るために、単位増加費用を100, 500, 1000万円、ファジィ制約の最大値を初期予算の10%~50%までの10%ごとに变化させて、ファジィDP問題を解いた。この結果から、得られる総便益と、均衡下のメンバーシップ関数値 μ を図示したものが図6-11および図6-12である。本図からわかるように、単位増加分が大きくなると、

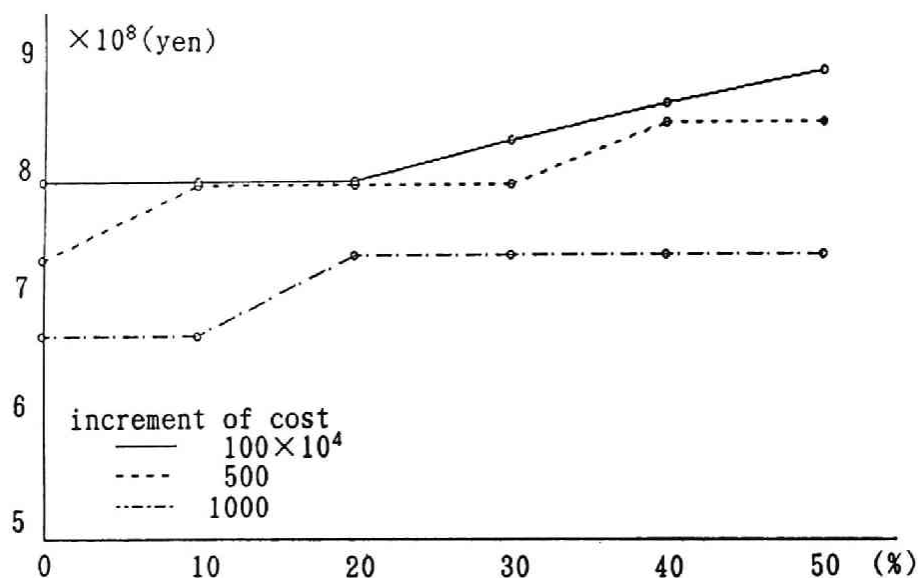


図6-11 ファジィDPによる計算結果

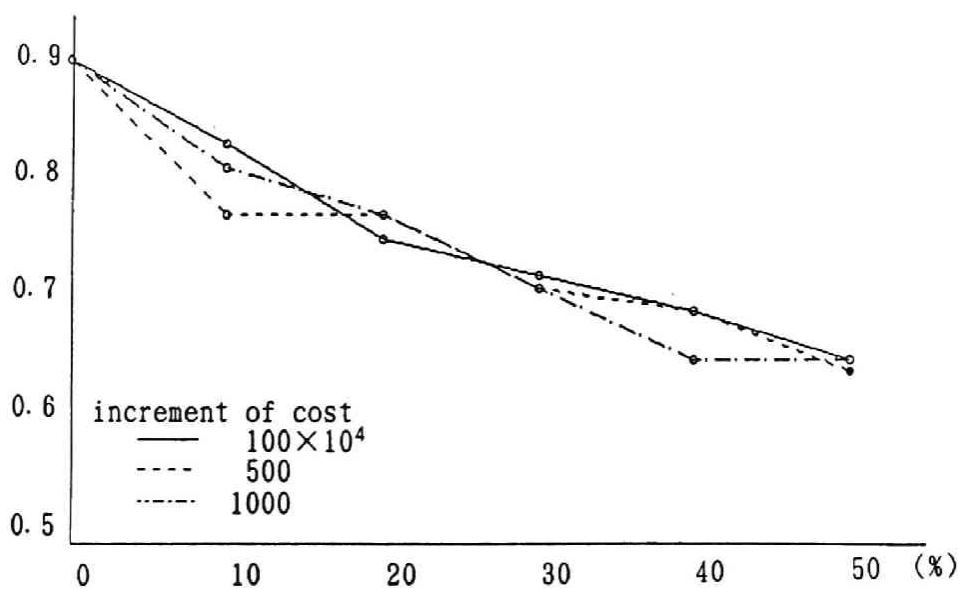


図6-12 均衡値 μ の値の変化

DP計画問題そのものの解が荒い変化のみしか生じないので、制約条件の余裕に対しても敏感ではなくなることがわかる。また均衡下の満足程度を示す μ の値は、逆に制約の幅が大きくなると（制約条件のメンバシップ関数の傾きが小さくなるので）徐々に小さい値になるように変化することになる。

（３）ファジィ制約とその意義

このように従来の方法を用いて解決される各種の問題にファジィな制約条件を用いることは、最も典型的なファジィ性考慮の方法である。したがって、これは一般に費用に関する余裕を考えたものである。都市高速道路のような施設の場合には交通安全対策に関する費用だけで予算が計上されることは、たとえば維持管理費用に含まれ、安全対策が必要なときに用いることができるものとなっている場合も多くみられる。したがって厳密に全維持管理費用の何％を占めるかをあらかじめ決定していくことはむづかしい。ファジィな数として決定されると考えることは現実的である。

また仮に、交通安全対策費用として一定の予算が計上されている場合においても、従来の方法では、若干の予算の超過も許すことのない意志決定がなされることになり、適切な代替案を選択しているかどうかは疑わしい。

これは第２章においても述べたが、計画問題の頑健性を考慮するものである。したがってあらかじめ計画における余裕（本研究の場合予算に関するもの）を考えて、このなかでできるかぎり満足されるものを採用するということである。

6-6 結 語

本研究は、都市高速道路における交通事故安全対策の策定方法を方法論的に検討した。

具体的な内容としては、まず6-2では都市高速道路で発生する交通事故に対してその発生状況について検討し、さらに交通安全対策の策定手順についての提案を行った。この結果、交通事故は、その頻度が非常に多く対策を検討すべき問題であることがわかり、かつ交通安全対策案の作成と評価という２段階の計画案策定手順が必要であることが示された。

つぎに、6-3においては、代替案の作成方法についての検討を行った。４種類の方法について作成方法を具体的に示すとともに、方法論の比較検討を行った。また実際の都市

高速道路への適用について6-4で考え、その結果いずれも適用性の高い方法であることが確認された。6-5においては、さきに示した方法へのファジィ性の導入方法を示し、具体的な計算を行った。以上のような検討から本研究の結論として以下の点が挙げられる。

- ①都市高速道路において、交通事故の発生は人身、物損はもとより、高速道路の使命である高速性も阻害されることになり安全対策の合理的作成方法の検討は重要である。また計画の余裕を考えたファジィ性導入は重要である。
- ②都市高速道路では、交通事故多発地点が明確であること、路線ごとに分離して検討が可能であることなどの理由から「予算制約内の個別代替案の組合せ」として定式化が可能であり、いくつかの解法が考えられる。これらは、その解の厳密性、立案作業の容易性などからそれぞれの特徴を生かすことができ、ファジィ性を含むことも可能である。

最後に本研究で提案した方法をさらに実用的なものとし、また有効な交通安全対策案を導くために検討すべき今後の課題を述べる。

- ①本研究では代替案の評価プロセスにおいて、交通安全対策に対する各側面からの評価を試みているが、評価項目の決定についての十分な検討が行われていない。とくに利用者の快適性や対策案の実行可能性についての十分な検討が望まれ、この点についてもファジィ性の考慮が可能である。
- ②ここでは、交通安全対策として施設整備などの物理的施策についてのべたが、実際には注意を喚起するための広報的活動、円滑な事故処理のための交通制御システムの充実、情報の伝達など副次的に存在する各種方法については言及していない。本研究で述べたような安全対策もこうした各種施策との総合的な取扱いのなかで初めて効率的である。したがって各施策を含んだ体系的な検討が必要である。
- ③ファジィな決定を行うことは、計画の余裕あるいは頑健性を考慮することになる。定式化を行ううえでファジィな取扱いが可能であるのは、かならずしも制約条件だけではなく、この点その他の定式化とその意義は検討する必要がある。

[第6章 参考文献]

- 1) 総務庁編：昭和62年版 交通安全白書，大蔵省印刷局，1987.
- 2) 阪神高速道路公団：阪神高速道路のしごと，1986.
- 3) 阪神高速道路公団：入路制御を実施している場合に受ける交通事故等による時間損失及び料金収入損失の調査研究報告書，1984.
- 4) 総務庁編：昭和60年版 交通安全白書，大蔵省印刷局，1984.
- 5) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック，技報堂出版，1984.
- 6) 江守一郎：自動車事故工学，技術書院，1974.
- 7) 佐佐木綱・秋山孝正・大藤武彦：交通事故による入路制御時に生じる損失についての考察，土木計画学研究・講演集，vol.6，pp.277-282，1983.
- 8) 秋山孝正・佐佐木綱：交通事故及び故障車による交通渋滞から生じる損失についての一考察，土木計画学研究・講演集，vol.7，pp.249-255，1984.
- 9) 阪神高速道路公団・（社）システム科学研究所：阪神高速道路における交通事故に起因する交通渋滞から生じる損失の調査研究業務報告書，1983.
- 10) 秋山孝正・秋山一郎：交通事故の評価と交通安全対策の策定方法について、住友海上福祉財団入選論文集、51-67 1986.
- 11) National Technical Information Service, Assessment of Techniques for Cost-effectiveness of Highway Accident Countermeasures, 1979.
- 12) 秋山孝正・山田正人・岡本慎一：都市高速道路における交通事故対策代替案の作成方法についての検討，土木学会関西支部論文集
- 13) 秋山孝正・佐佐木綱：都市高速道路交通安全対策案作成方法についての比較研究，土木計画学研究・講演集，vol.11，1984.
- 14) D.R. プレン・C. マクミラン，JR. 著，黒田・豊田・田部・馬渡訳：整数計画法入門，培風館，1976.
- 15) （財）高速道路調査会・（社）交通工学研究会編：交通工学用語辞典，技術書院，1985.
- 16) 木倉正美編：新体系土木工学 道路（Ⅳ）－付属施設－，技報堂，1984.
- 17) （社）日本道路協会：道路構造令の解説と運用，丸善，1984.
- 18) 坂和正敏：線形システムの最適化，森北出版，1984.

- 19) 浅居・ネゴイタ：ファジィシステム理論入門，第8章，オーム社，1987.
- 20) Takamasa Akiyama and Takashi Uchida：Traffic Safety Planning: Incremental Benefit-Cost Analysis with Fuzzy Budget Constarints, International Work shop on Fuzzy System Applications, 1988.
- 21) 秋山孝正：交通事故安全対策の系統的策定方法についての研究，（財）佐川交通社会財団，交通安全対策振興助成研究報告書，1988.

第 7 章

結 論

第7章 結 論

本研究では、ファジィ理論と知識工学手法を交通計画の問題に応用するための基礎的な検討を行うことを目的とし、具体的には高速道路の計画を検討を行った。こうした方法論を用いることは、計画に人間的な判断を含ませて考えるための基礎的な研究となると考えている。

これまで実際の各種交通計画においても、従来の最適化手法などを用いた数理計画的な方法の利用は、実用的な点からは、不合理な部分を持つが、いわゆる規範的な最適状態を導き出すためのモデルとして利用可能であり、これを計画の資料として用いられることが主要な役割りであると考えられている場合が多い。これに対して現実には実施されている都市の計画、交通計画においては、現実という点が重要となり、個々の地域・都市等に固有の状況が計画の意志決定の中心とされることから、なんらかの価値基準から最適性を求めることはむづかしいと考えられる。この意味で、最適化手法を中心とする数理計画的な方法を導入すれば、計画問題が解決されると考えることはできない。

しかし、現状の問題を抽出することばかりに努力を費やし、特に経済的な合理性を個々に満足させるための計画も、ヒューリスティックな意味からは重要であるが、これが必ずしも「人間性」の含まれる計画となっているとはいえないかもしれない。

つまり計画を考える場合には、いずれの極端な方法論も避けるべきである。すなわち、最適な計画とは実は計画における一面的な状況の最適な状態をモデル化したことであり、たとえ多目的・多目標のものを考えても、ある種のハードな効率性を追求していることでありその一面性は取り去ることができない。また現実をあまりにも採用し過ぎることは、個々の問題に対する都合のよい解決は図れるかもしれないが、普遍性と汎用性の欠如した計画を求めていることになるのである。この点は釈尊の唱えるように真理は中道にあるのかもしれない。一般に度の過ぎた緊張の中では、人間のものの考え方は一徹で依り地となり、逆に安楽と放逸の中であって、人間はややもすれば退廃の思想を持つものである。かかる両極端に執着しては真理は得られないであろう。

すでに、現在の計画思想のなかで多くのものは、このような事実が気がついている。たとえば「ハード」から「ソフト」へとといった最近の動向が挙げられ、あるいは人間らしい

計画、文明への反省など豊かな生活に対する反省が多く語られていることから窺い知ることができるのである。

本研究で取り上げた方法論のなかで、ファジィ理論はいくつかの計画問題における実用的モデリングの局面において、人間的判断を表現するための重要な視点を持っている。また知識工学手法は、近年情報工学の分野で開発の盛んな方法論であり、本来「人工知能」とよばれる人間的計算機の実現を目指した研究から生まれてきたものである。

したがって本研究では、こうした2つの手法を用いて具体的なモデル化を行うことで「人間性のある計画」の観点から、特に交通工学のなかでも都市における高速道路の計画ということを念頭におき、その応用的側面を検討したわけである。各章での研究の結果、以下に述べるような知見が得られた。

まず第2章では、まず本研究における問題解決の中心的方法であるファジィ理論と知識工学手法について、その基礎的概念についての紹介と具体的な土木計画における適用についての整理を行った。これまでの同分野における応用が必ずしも体系的、総括的なものとして位置づけられるものではないが、今後の応用面における実用性を示した。今後は本研究のような高速道路の交通計画といった課題だけではなく多くの問題解決にこれらの方法が有効であると考えられる。

第3章においては、ファジィ理論のなかでも、現在のところもっとも実用的であるとされる「ファジィ制御」の方法を用いた検討を行った。特に現在都市高速道路で行われているヒューマンオペレータによる「ブース閉鎖・制限」の問題を取り扱った。こうした現実の交通制御を考えるとさきにのべた、最適性と現実性が実際にも両面から用いられていることがわかる。すなわち制御の問題はふつう一般的な数理解法（初等制御理論では微分方程式、都市高速道路交通制御ではLP制御）が知られているが、この結果を基本としながらも実際には、現実的要因からの判断が含まれている場合が多いのである。つまりここで用いたファジィ制御にしても、結局はファジィ理論を用いた制御手順の定式化であるから、本来実用的に人間の判断が中心となっている場合に用いることではじめてその特長を生かす事ができるのである。ここでの研究では単一路線の交通制御を実際の判断に近い形で記述するとともに、このモデルを用いてより妥当な交通制御ルールを模索していくことに対する可能性が示された。特に「基本モデル」とよばれる記述確認用のモデルを用いて、随時ルール群を改良・変更していくことによって「改良型モデル」が構築されたことは方

法論的にも注目に値することである。これはファジィ制御に関する他分野の多くの研究に関連するものであり、いわゆる不確実な状況で「推論」を行うことで問題を解決しているような分野においては、本研究と同様なアプローチが今後重要になっていくと考えられる。

第4章ではエキスパートシステムを構築し第3章と同様な交通制御の意志決定に用いることで知識工学の方法を交通工学の分野に用いる場合の基礎的な検討を行ったものである。この方法は、簡単にいえば専門家の知識をもとにひとつのシステムを構成するものであり、この意味では応用上重要である。つまりエキスパートシステムを構築することによって、人間の思考過程をある種のモデルとして考慮するものである。この章においては実用的なエキスパートシステムの構築が検討された。その結果、第3章におけるファジィ推論ではルールの記述とプログラミングの点から若干問題が複雑化するので容易ではなかった「都市高速道路全路線」を対象とした交通制御の判断を行うことができるシステムが構築された。またここでは、現在の情報処理技術、コンピュータの進歩という点を考慮して、パーソナルコンピュータを利用するとともにビジュアルな表現を用いたシステムとしている。交通工学における方法論的な立場に立てば必ずしも計算機技術を向上させることが学問的進展に相当するとはいえないが、こうした実用上の利便性をかんがえた表現方法の検討は現在各分野の研究動向や社会的な状況を見ても考慮すべき点であると思われる。さらにここでの研究は第3章と研究内容を同じくすることで、2つの呼応した方向性を示すものとなっている。すなわち第3章においては、交通制御におけるファジィ推論ということで、まず「人間的」なファジィ性を記述することに主要な目的があるが、ここでの研究においてはエキスパートシステムとしての「推論の記述」そのものに主目的があるといってもよいであろう。この章では比較的大きな範囲を対象とした判断システムを構築したあとで、不確実性の導入を確信度とファジィ理論の併用ということで今後の研究の方向性を示したものである。

第5章においては、前章でその有効性が述べられたエキスパートシステムを交通情報提供という交通工学上問題へ応用したものである。高速道路で利用者への適切な情報を交通情報板に示すという交通情報処理の問題は近年多くの検討が行われるようになった課題である。ここでは、高速道路上で発生した交通障害に関する情報を効率的に処理することが目的である。そしてこうした問題では従来から用いられているように「手続き型」の情報処理が行われ、とくに一旦交通制御システムの一部として交通情報処理部分が作成されて

からは情報処理手順の検討や変更はきわめて難しいものとなっている。この研究は、とくにこの問題を解決するためにエキスパートシステムのヒュリスティックな面を特に有用と見なしているのである。もちろんここでも第4章において検討されたエキスパートシステムの特長を生かしたシステムの構成を考えるとともに、情報処理の効果をいくつかの指標を用いて算出できるものとした。本来、高速道路利用者といってもトリップ距離、利用経路などによって情報の価値は異なっている。また通信技術等の進歩に伴って各種計画問題に対しても今後情報が与える影響を十分吟味することは必須の条件となってくることが十分予想されるため、こうした情報評価の可能性をここで検討したことは有意義である。さらに情報処理に関して将来の方向性を考えると、この章では効率的な情報伝達という点に注目したため検討はされなかったが、利用者に適切な「情報の作成」も重要である。つまり真に意味のある情報処理をおこなうためには、情報伝達の効率性に加えて適切性が必要だということである。この点では、すでに利用者のファジィ性を考えた情報処理の方法など研究の萌芽があり、この章における研究を補完し今後さらに発展するものと思われる。

第6章においては、高速道路の安全性からの計画に対する応用的な課題として、交通安全対策立案に関する問題解決を検討した。ここでは従来の代替案計画手法を整理し、高速道路に適用する場合の方法論的課題について基礎的研究を行った。そして、こうした計画に人間の判断を導入するためのひとつの方法として、ファジィな制約条件を持つ数理計画問題を用いた。これは従来の方法で得られる分析結果に加えて、新たに計画予算のファジィ性を考慮しようとする試みである。特に代表的な方法として、経済的な選択手法である増分便益費用分析と数理計画法のダイナミックプログラミングの方法を取り上げそれぞれファジィ制約という不確実な状況下で意志決定を行う場合を考えたものである。ここでの研究によって、「組合せ最適」の状態を検討する問題に対しても、これまでに開発されているファジィ数理計画の方法を用いることで解決が可能であることがわかった。また得られた解の性質から従来の数理計画的な決定にファジィ性を包含させた場合、とくに従来法と矛盾する解を与えるわけではなく、簡単にいえば選択の余地を広く考慮した解が得られることがわかった。これは本研究を通じて考えたファジィ理論応用における特長が交通工学上の問題の解決を通して一層明確で具体的に表現されたものといえる。さらにここでの研究においては、計画立案上の予算のファジィ性について検討したが、一般に数理計画的な方法を用いる場合にその定式化の変更によって、各種の計画問題を処理できるように、同様な

定式化、解法の開発によってさらに各種のファジィ性の考慮が可能になるものと考えられる。この点ファジィ理論の進展を踏まえた今後の検討が必要となろう。

以上のように各章において、ファジィ理論と知識工学的手法に関する実用的な応用についての検討が行われた。このような方法の利用が交通工学上の問題の解決に付加的な価値を与えることができれば、これはさきに述べたように「人間性の存在」を求めている場合である。ファジィ理論が社会学、心理学の方面での適用が見られること、知識工学的な方法が、認知心理学という点から注目されているのも、このような問題点に人々が気づいたことによるのかもしれない。

本研究の方法論を簡単にいってしまえば、ファジィ理論は「従来の集合に判断の幅を付したものである」とあり、知識工学は「コンピュータによる知識のプログラム表現」といったことになるかもしれない。しかし、こうした作業を行っていくうえで、計画上に重要となる知見は数多く存在するのである。

たとえば、これまでの方法では、とにかく「ある値」を取るものはよい悪いといった議論が用いられていたが、「かなり大きい」といった表現を用いることが可能となるのである。本研究での各章における成果はこの2つの方法論の応用という点から考察を試みていることから、一般に不確実といわれているすべての現象を解決したものでは有り得ないが、今後計画を考えるうえでの解決方法に方向性を与えるとともに、微力ではあれ方法論的な糸口を提示するものであると思われる。

最後に、上記のような研究成果を踏まえて、今後の土木計画における問題解決に対するひとつの展望を示すことにしたい。

これまでの問題解決には、社会における問題を数式的モデルを用いて解決しようとする場合が多くみられた。すなわちこのモデリングにおいては、いずれにせよ限られた変数をもとにいくつかの人間の行動仮設を用い、理論的にモデル構築を行うことが盛んに行われてきたのである。このようなアプローチは、自然の現象をモデリングする「物理学」の考え方にも通じるところがあり、自然科学の方法としては、すでに評価の固まった一般的方法であるかもしれない。そしてこのような方法には、演繹的な解決手段として数理解析方法が用いられる場合がおおく、実際の現象から調査抽出されたデータを用いたモデルの挙

動を記述、検証することができることから、モデル構築の方法としては有意義である。

これまでのモデルは、とにかく「論理的でなければならない」という点からはじまって、おそらく根源的な（primitive）段階からすべてを知らねばならないという考えを含んでいるようである。このことは科学的探求心からみれば妥当な見解であるかもしれない。たとえば、ある地域のみを考えてもよいが、すべての人の選好構造（価値観）が同一であれば、この地域の計画は極めて簡単である。サンプルデータに対する構造はすべての適合性を保証するし、モデルにおける最適状態をそのまま実現できるからである。この意味で、さきに数式的モデルと呼んだ方法もふつう「現象記述型」のものと「最適政策的」なものが存在することになるが、いずれにせよ機械的、数式的決定が重要と考えられているのである。

そして、わが国においても西洋的ヒューマニズムに根ざした物質文明の進歩には、明治の文明開化の時代から必ずしも否定的ではなく、今や技術的にも経済的にもこのような世界に対する影響力を持つ国に成長した点を見るとあながち不用なことではなかったのである。しかしすべての計画がこのような合理的、効率的な最適状態を見いだすことで有効とは限らないのである。とくに土木計画のみならず、一般に社会計画においては「人間」の存在を失った計画を策定することは、最終的な意味を喪失していると思われるのである。

つまり人間の行動は、論理的部分と非論理的部分があるのである。すべてのものが合理的であるから、全ての計画がうまく機能していると考えるのは極めて早計である。効率性を重視した、住民の利益の総和を最大化するような計画は不十分であるといえよう。さらに危険を感じるのは、いわゆる「余裕のない計画である」合理性を追求するあまりに、実行に関する余裕を一切持たない計画が現出するかもしれないものである。

本研究で対象とした高速道路の計画に関してもこのことは十分に検討されなければならないであろう。すなわち、このような計画思想のもとで高速道路を計画していけば、ある種の（多くの場合、経済的でかつ円滑効率最大の計画となるであろう。）最適化が基本となり、地域への影響を考慮しえなくなるばかりでなく、おそらく、計画の変更可能性も乏しいものになってしまうのではないだろうか。

都市における高速道路も「ソフト」の時代といわれ、「モノ」重視から「心」志向の時代を踏まえた、潤いのある豊かな社会の一端を担わねばならないといえよう。しかし本当

に十分な考え方のもとで、都市の計画を考えているとはいいいがたい。現在、都市に対する計画にイメージや景観といった物理的効率性や物的な完全性以外の評価が必要とされ各種の研究が行われている。このような点でもここで取り上げた方法は、その有効性を示すであろう。本研究でとりあげた都市における高速道路における計画に対してもまったく同様な検討が可能である。

いずれにせよ、本研究で得られた視点は、「人間不在の計画は受け入れられることも少ないのではないであろうか。」という方向性である。

もちろん、ここで注意せねばならないのは、方法論に捕らわれて意味のない研究を行うことである。かならずしも社会のすべての現象が不確実であるわけではないのである。たとえば不必要なファジィ理論や知識工学の導入を避けねばならないということである。

一般に人間の生活において、「見られる自己」を固くせず、つっぱらず、そして心身をゆるめることは、同時に心のゆとりとして表れるといわれる。ふつう能率をすべてに優先させる現代社会では、有用、有効、有力という尺度を人間にも当てはめようとしているのである。したがって「あそび」「ゆとり」のあることを不完全さであると考えるのである。価値観でのおこなわれた計画があるとすれば、ある種受け入れがたく、またその融通のなさが最終的な失敗に結びつくのではないかという危惧が生じうるのである。

そして外面的な形を確実化しようとする人々は言葉・記号・数字などの表現に頼りやすい。それらの固定された意味が、自分自身を確実化してくれるかのように錯覚するからである¹⁾。またこのような思考に陥ると、たとえば数量的表現でさえあれば正確だと思い込むことにもなる。いわば神経症的な思考でありこのような人々は、数学的表現ばかりでなく、権威、力、外観の立派なものが重要であると考えがちである。このような、発想からくるゆとりのない計画には「人間」が存在し得ないとかんがえられる。

本研究においては、最終的に目標とするところの一端を解決したにすぎないが、今後の考え方の方向性を示したものであるといえる。計画にある種の「ゆとり」を持って検討することが重要である。そしてこのような考え方を持つためには、一切の根本が無明からくるものであることを知り、惑と業の連鎖にとらわれないことが必要である²⁾。いわゆる五蘊皆空を知ることが重要であると思われる。

[第7章 参考文献]

- 1) 石田春夫：自己不安の構造，講談社現代新書，1981.
- 2) 高神覺昇：般若心經講義，角川文庫，1953.

